

**TAKLİTÇİ DEVRE KULLANILARAK MEMRİSTÖRÜN GERÇEK ZAMANLI
UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper KARACA

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan GÜLER

ARALIK-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAKLİTÇİ DEVRE KULLANILARAK MEMRİSTÖRÜN GERÇEK ZAMANLI
UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper KARACA

141113106

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.12.2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 22.12.2017

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hasan GÜLER (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Sencer ÜNAL (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü)

ARALIK-2017

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını yürüten ve tezin hazırlanma aşamasında bilgi birikimi, tecrübesini ve yardımlarını eksik etmeyen değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan GÜLER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte değerli fikirlerini, bilgi birikimini ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Araştırma Görevlisi Muhammet Emin ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Ayrıca FÜBAP-MF.16.18 numaralı proje dahilinde yaptığı desteklerden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne teşekkür ederim.

Son olarak, bütün hayatım boyunca her koşulda arkamda duran ve zorlukları aşma gücü veren sevgili aileme ve oğlum Ertuğrul'a destekleri için sonsuz şükranlarımı sunarım.

Alper KARACA

Elazığ-2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	2
1.2.Tezin İçeriği.....	5
2.MEMRİSTÖR.....	6
2.1. Giriş	6
2.2.TiO ₂ Tabanlı Memristörler	8
2.2.1. Pt/ TiO ₂ /Pt Memristör.....	8
2.2.2. Ag/ TiO ₂ /ITO Memristör.....	9
2.3. Memristör Yük-Akı İlişkisi	9
2.4. Memristör Akım-Gerilim İlişkisi	10
2.5. Yük-Kontrollü Memristör ve Akı-Kontrollü Memristör	11
2.6. Memristör Özellikleri	12
2.7. Memristör Modelleri	14
2.7.1. Lineer Sürüklenme Modeli.....	14
2.7.2. Nonlineer Sürüklenme Modeli	15
2.7.3. Simmons Tünel Bariyer Modeli	17
2.7.4. Eşik Uyarlamalı Memristör (TEAM) Modeli.....	18
2.8. Memristör Uygulamaları	18
2.8.1. Analog Uygulamaları	19
2.8.2. Dijital Uygulamaları	20
3.LabVIEW PLATFORMUNDA MEMRİSTÖR MODELLEME	21
3.1. LabVIEW	21
3.2.Multisim	22

3.3. Lineer Sürüklenme Modelinin LabVIEW Ortamında Gerçeklenmesi	23
3.3.1.Memristör Modellemenin Matematiksel İfadesi	24
3.4.Memristör Taklitçi Devresi	28
4.PASİF FİLTRELER	33
4.1. Yüksek Geçiren Filtre.....	33
4.2.Alçak Geçiren Filtre	34
4.3.Memristör Tabanlı Alçak ve Yüksek Geçiren Filtre	35
4.3.1.Memristör Tabanlı Yüksek Geçiren Filtre	36
4.3.2.Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre	36
5.TAKLİTÇİ DEVRE SONUÇLARI	38
5.1. Memristör Taklitçi Devresi	38
5.2. Memristör Tabanlı Yüksek Geçiren Filtre	40
5.3.Alçak Geçiren Filtre	44
6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	49
6.1. Sonuçlar	49
6.2. Öneriler.....	50
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ	55

ÖZET

Memristör, elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki ilişki iki uçlu devre elemanı olarak 1971'de Leon Chua tarafından ortaya çıkarıldı. Ancak memristör ilk kez fiziksel olarak Richard Stanley Williams önderliğindeki HP ekibi tarafından 2008 yılında gerçekleştirildi. HP tarafından yapılan fiziksel prototip memristör bilim dünyasında büyük yankı buldu ve bu tarihten sonra çok kısa sürede memristör ile çok farklı alanlarda çok sayıda çalışma yapıldı.

Fiziksel olarak üretilen memristör ticari olarak üretilmediği için henüz mevcut değildir. Memristörün direnci, üzerinden geçen yük miktarıyla değişir. Bir yönde geçen yük, memristörün direncini artırırken ters yönde geçen yük memristörün direncini azaltmaktadır. Memristörün diğer temel devre elemanlarından en önemli farkı, geçmişindeki durumu hafızasında taşıyor olmasıdır. Memristör özellikleri sayesinde, bilgisayar mimarileri, nöromorfik sistemler, haberleşme sistemleri, kaotik sistemler ve dijital devreler gibi birçok memristör tabanlı tasarım uygulamalarında yer almıştır. Lineer olmayan özelliğe sahip olması memristörün karmaşık devrelerde kullanılabileceğini gösterdi. Yakın zamanda lineer olmayan denklemlere sahip memristör tabanlı kaotik devrelerin tasarımı oldukça dikkat çekmektedir. Memristör ticari olarak üretilmediği için, memristör tabanlı kaotik sistemler deneysel olarak yapılır ve doğrulanması genellikle ayırık elemanlarla gerçekleştirilen farklı taklitçi devreler ile yapılmaktadır. Bu durum devre tasarımını zor hale getirmektedir. Bu nedenle memristör tabanlı kaotik sistemleri en doğru şekilde ve az sayıda eleman kullanarak gerçekleştirmek önem arz etmektedir.

Bu çalışmada; memristör tabanlı alçak ve yüksek geçiren filtrelerin literatür de mevcut olan donanım gerçekleştirimleri ve nümerik benzetim programları aracılığıyla gerçekleştirilmesi ve incelenmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Memristör; LabVIEW; Pasif filtre

SUMMARY

THE REAL TIME IMPLEMENTATION OF MEMRISTOR BY USING EMULATOR CIRCUIT

Memristor as two terminal circuit element relating electrical charge and magnetic flux was proposed in 1971 by Leon Chua. But its first practical implementation has been realized by Richard Stanley Williams' group at HP laboratory in 2008. Memristor has drawn the worldwide attention after HP released its invention and after this year many studies have been made in very different fields. Although it is physically implemented, there is no memristor element produced commercially. Like a resistor, it creates and maintains a safe flow of electrical current across a device, but it can also remember the last charge that was flowing through it. This feature makes memristor different from the other circuit devices. Due to the characteristics of memristor, many memristor based designs such as computer architecture, neuromorphic, communication systems and digital circuits are available in the literature. Because of the nonlinear feature of a memristor, it can be used in chaotic system designs and recently the designs of memristor based chaotic circuits which have different nonlinearities have attracted more attention. Since the commercial productions of memristors are not available yet, the experimental testing and verifying of memristor based chaotic systems are performed by emulator circuits generally composed of discrete components. This situation makes the circuit design quite complex and difficult. For this reason, it is important to implement the memristor based chaotic systems in a correct way by using fewer components.

In this thesis, it is aimed to examine the available hardware implementations of the memristor based low and high pass filter in the literature and to research the systems via numerical simulation programs.

Key Words:, Memristor; LabVIEW; Passive filter

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Temel devre değişkenleri ve aralarındaki bağıntılar	6
Şekil 2.2. Memristör elemanı modeli ve $q-\phi$ ilişkisi	7
Şekil 2.3. Nano boyutlarda HP tarafından gerçekleştirilen memristör.....	7
Şekil 2.4. Pt/ TiO ₂ /Pt yapısı.....	8
Şekil 2.5. Ag/ TiO ₂ /ITO memristör yapısı	9
Şekil 2.6. Memristörün, hepsinin monoton olarak artan özelliklere sahip üç yük-akı özelliği örnekleri.....	10
Şekil 2.7. Memristörün farklı frekanslar için akım-gerilim ilişkisi.....	11
Şekil 2.8. Memristif sistemlerde aygıtların temsilleri	13
Şekil 2.9. Üç farklı frekans değeri için memristörün lineer sürüklenme modeli.....	14
Şekil 2.10. Nonlineer sürüklenme modelinin kullanıldığı histerezis döngüsü.....	16
Şekil 2.11. Strukov vd. tarafından önerilen pencere fonksiyonunun grafiği.....	17
Şekil 2.12. Simmons tünel bariyer modeline dayanan fiziksel memristör yapısı.....	18
Şekil 2.13. Memristör ve memristif sistem uygulamaları	19
Şekil 3.1. LabVIEW programının ön paneli (front panel) ve blok diyagramı (block diagram)	22
Şekil 3.2. Multisim programının panel görüntüsü.....	23
Şekil 3.3. Memristörün HP laboratuvarına göre geometrik şekli	24
Şekil 3.4. LabVIEW ortamında gerçekleştirilen memristör modeli.....	25
Şekil 3.5. LabVIEW ortamında gerçekleştirilen memristör modeli ön paneli	26
Şekil 3.6. Memristörün histerezis çevrimi 1V-20Hz için.....	26
Şekil 3.7. Memristörün histerezis çevrimi 1V-100Hz için.....	27
Şekil 3.8. Memristörün histerezis çevrimi 1V-500Hz için.....	27
Şekil 3.9. Memristörün yük-akı grafiği 1V-20Hz giriş sinyali için.....	28
Şekil 3.10. 1V-20Hz V_{mem} geriliminin grafiği	28
Şekil 3.11. Memristör Taklitçi Devresi	29
Şekil 3.12. Chua Memristör taklitçi devresi	30
Şekil 3.13. Memristör taklitçi devresi	30
Şekil 3.14. Memristör taklitçi devresinin Multisim tasarımı.....	31

Şekil 3.15. Multisim platformunda memristör devre modeli	31
Şekil 3.16. Taklitçi devre akım-gerilim ilişkisi	32
Şekil 3.17. Taklitçi devrenin akım ve gerilim grafiği	32
Şekil 4.1. Yüksek Geçiren Filtre	33
Şekil 4.2. Yüksek geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre yüksek geçiren filtre	34
Şekil 4.3. Alçak Geçiren Filtre	35
Şekil 4.4. Alçak geçiren filtre Karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre.....	35
Şekil 4.5. Memristör Tabanlı Yüksek Geçiren Filtre	36
Şekil 4.6. Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre	37
Şekil 5.1. Memristör taklitçi devresi board üzerine kurulumu	38
Şekil 5.2. Taklitçi devre akım-gerilim ilişkisi	39
Şekil 5.3. Taklitçi devrenin akım ve gerilim grafiği	39
Şekil 5.4. Yüksek geçiren filtre	40
Şekil 5.5. Yüksek geçiren filtre kazanç grafiği	40
Şekil 5.6. Yüksek geçiren filtre faz eğrisi	41
Şekil 5.7. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre	41
Şekil 5.8. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre kazanç grafiği (20Hz)	41
Şekil 5.9. Memristör tabanlı yüksek geçiren faz eğrisi	42
Şekil 5.10. Memristör tabanlı yüksek geçiren faz eğrisi (400 Hz)	42
Şekil 5.11. Memristör tabanlı yüksek geçiren faz eğrisi	42
Şekil 5.12. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre giriş ve çıkış sinyali (20 Hz).....	43
Şekil 5.13. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre giriş ve çıkış sinyali (400 Hz).....	43
Şekil 5.14. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtreye ait giriş ve çıkış sinyalinin gerçek zamanlı sonucu	44
Şekil 5.15. Alçak geçiren filtre.....	44
Şekil 5.16. Alçak geçiren filtre kazanç grafiği	45
Şekil 5.17. Alçak geçiren filtre faz eğrisi	45
Şekil 5.18. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre	45
Şekil 5.19. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre kazanç grafiği (20 Hz)	46
Şekil 5.20. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre faz eğrisi	46
Şekil 5.21. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre kazanç grafiği (400 Hz)	46

Şekil 5.22. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre faz eğrisi	47
Şekil 5.23. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre giriş ve çıkış sinyali (20 Hz).....	47
Şekil 5.24. Memristör tabanlı alçak geçiren filtreye ait giriş ve çıkış sinyalinin gerçek zamanlı sonucu	48

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Taklitçi devresinin eleman değerleri	30
---	----

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
CNN	: Celluar Neural Network
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
FPGA	: Field Programmable Gate Array
OTA	: Operational Transconductance Amplifier
DDCC	: Differential Difference Current Conveyor
CCII	: Current Conveyor 2nd Generation
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre

1. GİRİŞ

1971’de Leon Chua, elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki ilişkiyi gösteren dördüncü bir devre elemanını literatüre sundu [1]. Chua’ nın sunduğu memristörün temel özelliği; üzerinden bir yönde akım geçerken direnci artan, ters yönde akım geçtiğinde ise direnci azalan rezistif bir eleman olmasıdır. Memristörün üzerinden geçen akım kesildiğinde yeniden akım geçene kadar memristör aynı direnç değerinde sabit kalır. Bu durum memristörün bir hafızalı direnç elemanı olduğu (memory resistor) anlamına gelir ve memory resistörün kısaltması olan memristör ismini de buradan almaktadır. Memristör elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki ilişkinin bir sonucu olarak ifade edilmektedir.

$$d\phi = Mdq \quad (1.1)$$

Memristörün elektronik yapısı basit değildir. Halen laboratuvar ortamında üretimi gerçekleşen bir fiziksel eleman olmasından dolayı memristör için yapılan çalışmalar gerçek zamanlı olarak çok fazla gerçekleştirilememesi araştırmacıları bilgisayar ortamında benzetim çalışmalarına bağlı kılmaktadır. Memristörün fiziksel olarak üretimiyle beraber bilim dünyasında memristör alanında yapılan çalışmalarda bir hayli artış yaşanmıştır. HP tarafından üretilen model standart kesin bir model olmadığından araştırmacılar bu yeni eleman için çeşitli modeller oluşturma uğraşına girdiler. Oluşturulan bu yeni memristör modellerinin mantık devreleri, işaret işleme, yapay sinir ağları, kontrol sistemleri, RFID (Radyo Frekansı ile Tanıma Teknolojisi) gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanımıyla beraber memristörün kullanımı yaygınlaştı. Memristörün küçük boyutlu olması, düşük enerji tüketimi, anahtarlama özelliği, sinaps benzeri davranışı, hafıza özelliğinin olması gibi birçok özelliğinin sonucu olarak literatüre birçok çalışma sunulmaktadır.

Bu tez çalışmasında memristör elemanın özellikleri incelenmiş olup, devre modeli LabVIEW platformunda modellenerek analiz edilmiştir. Memristör taklitçi devresi kullanılarak memristör tabanlı pasif filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Burada pasif filtrenin bant genişliği, frekans gibi özellikler incelenerek, memristörün hafızalılık özelliğinin filtreler üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Memristör, elektriksel yük ile manyetik akıyı ilişkilendiren iki uçlu devre elemanı olarak 1971'de Leon Chua tarafından ileri sürüldü [1]. Daha sonra da HP ekibi tarafından fiziksel olarak ilk kez üretimi laboratuvar ortamında gerçekleşti [2]. Chua ve Kang'a ait makalede memristörün biraz daha detaylandırılmış anlatımı yer almıştır. Memristörün kullanılabileceği memristif sistemler adı altında yeni bir sistem tanımlanmış ve bunun kriterleri verilmiştir. Memristörün akım-gerilim karakteristiğinin histerezis eğrisi şeklinde olduğuna ilk defa bu makalede yer verilmiştir. Ayrıca yüksek frekanslarda memristörün akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal bir direncin akım-gerilim karakteristiğine benzediğinden bahsedilmiştir [3].

1990'da S. Thakoor ve arkadaşları, Chua'nın önerdiği memristör ile herhangi bir bağlantısının olup olmadığı belli olmayan elektriksel olarak yeniden programlanabilen bir ayarlı tungsten-oksit direnç geliştirmişlerdir. 1994 yılında Buot ve Rajagopal memristörün akım-gerilim karakteristiğine benzer şekilde ancak Chua'nın çalışmasından bağımsız olarak AlAs/GaAs/AlAs kuantum kuyusu diyotlarda akım-gerilim karakteristiğini tanımlamışlardır [4-5].

2000 yılında Beck ve arkadaşları IBM'in Zürih Araştırma Laboratuvarı'nda ince oksit filmlerde yeniden üretilen direnç anahtarlama davranışını tanımlamışlardır. Bu çalışmanın özelliği burada bahsedilen anahtarlamanın histerezistik özelliğinin memristörün ki ile benzer olmasıdır [6]. 2001'de Liu ve arkadaşları oksit katmanlarının yüksekten-düşüğe direnç oranını gerçekleştirmede çok önemli olduğunu göstermiştir [7].

2007 yılında Gregory Snider yeniden yapılandırılabilir bilgisayar yapılarında memristöre benzer iki terminalli direnç anahtarı uygulamasını tanımlamış ve patentini almıştır. Daha sonra Snider memristif nano aygıtların örüntü tanıma ve yeniden yapılandırılabilir devre mimarilerinde kullanışlı olduğunu anlatan bir makale yayınlamıştır [8].

Daha sonra 2008 yılında Itoh ve Chua memristör tabanlı kaotik Chua osilatör devrelerini tanıtmışlardır. Burada Chua diyotunun yerine negatif kondüktansa sahip aktif akı-kontrollü memristör (veya yük-kontrollü memristör için negatif rezistans) ile monoton artan ve parçalı lineer (PWL) fonksiyonlarla karakterize edilen pasif memristör kullanmışlardır [9]. Bu çalışmadan sonra, akı-kontrollü memristörün PWL fonksiyonu,

düzgün kübik nonlinearer fonksiyon ve parçalı kuadratik nonlinearer fonksiyonla karakterize edildiği Chua tabanlı kaotik devreler tasarlanmıştır.

Alternatif olarak farklı memristör tabanlı kaotik devreler literatürde sunulmuştur. Bahsedilen bu teorik çalışmalara ek olarak memristör tabanlı birçok deneysel çalışma da ayrık taklitçi devreler kullanılarak test edilmiş ve doğrulanmıştır. Deneysel çalışmaların ilki, Muthuswamy tarafından yapılmıştır. Muthuswamy Chua tabanlı kaotik sistemi kübik nonlinearer fonksiyonuyla karakterize ettiği memristörü kullanarak deneysel olarak gerçekleştirmiştir [10].

Bao ve arkadaşları memristör tabanlı kaotik Chua devresinde memristörü düzgün parçalı-kuadratik nonlinearer fonksiyonuyla karakterize ederek analog bir gerçekleştirim sunmuştur [11]. Mahvash ve Parker 2010 yılında memristör tabanlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada SPICE ortamında farklı devrelerde kullanılmak üzere bir memristör devresi tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan bu model bir alçak geçiren filtreye (AGF) uygulanmış ve sonuçları paylaşılmıştır [12].

Başka bir uygulamada ise Buscarino ve arkadaşları PWL fonksiyonuyla tanımladıkları memristörü kullanarak hücresel sinir ağı (Cellular Neural Network, CNN) tabanlı kaotik devre tasarlamışlardır [13]. Shadaram ve arkadaşlarına ait çalışmada doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli kullanılarak yeni bir memristör modeli elde edilmiştir. Elde edilen model mantık ve hafıza uygulamalarında kullanılmıştır [14].

Ayrık donanımların yanı sıra CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor-Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken) ve Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array, FPGA) kullanılarak tasarlanan memristör tabanlı deneysel uygulamalarda literatür de sunulmuştur [15]. Kvatinsky ve arkadaşlarına ait çalışmada adaptif bir memristör modeli tasarlanmıştır. Model doğrusal iyon sürüklenmesi, doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi ve Simmons Tünel Bariyer modeli gibi memristör modellerine bunların uyarlanabileceğini göstermişlerdir [16]. Song ve çalışma ekibi ise 2013 yılında memristörün Multisim ortamında gerçeklenmesini vermişlerdir [17].

Memristör modeli kullanılarak kaos temelli osilatör devreleri oluşturulmuş ve bu alanda yapılan çalışmalardan biri M. Köksal ve S.E. Hamamcı tarafından literatüre kazandırılmıştır. Burada memristör temelli osilatörün akıllı kayma kipi modeli üzerine incelemelerde bulunulmuştur [18].

Vanadyum dioksitin özelliklerini kullanarak deneysel olarak bir uyarlanabilir LC devresine bir memristör yerleştirilerek filtreleme uygulamasını T. Driscoll ve arkadaşları gerçekleştirmiştir. Bu devre, seçilen frekans sinyallerini, rezonans tepkisinin kalite faktörünü keskinleştirerek tepki vermek de olup böylece giriş dalga formuna göre "öğrenir" olarak davranan bir devre olduğu vurgulanmaktadır [19]. Aynı dönemde Iu ve arkadaşları tarafından memristör tabanlı kaotik bir devrenin kontrolüyle Twin-T Notch filtreye uygulanması gerçekleştirilmiştir [20].

2013 yılında Ascoli ve arkadaşları memristörün analog uygulamalardaki değişken özelliklerinin incelenmesini gerçekleştirmişlerdir. Memristör tabanlı birinci dereceden alçak ve ikinci dereceden bant geçiren filtreler frekans değişimi PSpice programında sınır koşulu modeliyle incelenmiştir [21].

2014 yılında Ş. Yener ve arkadaşlarının memristörün filtrelere uygulanan bir takım çalışmaları bulunmaktadır. Tasarlanan filtrelerde kullanılan bazı elemanların yerine memristör kullanılarak incelemelerde bulunmuşlardır. Memristör tabanlı Sallen-Key Süzgeçler ve memristör tabanlı filtre analizleri gibi birçok çalışmaları mevcuttur. Ş. Yener ve arkadaşları çalışmalarında memristörün VSLI teknolojisi için uygun DDCC (Diferansiyel Fark Akım Taşıyıcı) temelli bir CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor-Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken) memristör gerçekleştirmişlerdir. Burada kullanılan modeli kaotik haberleşme devresine uygulamış ve sonuçları analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda CMOS modeli ile gerçekleştirilen memristör modelinin gerekli kaotik davranışı sağladığı vurgulanmış ve bu alandaki çalışmalara yön verecek bir çalışma olduğu belirtilmiştir [22-24].

Sözen ve Çam tarafından yapılan çalışmada ise yeni bir memristör taklitçi devresine yer verilmiştir. Bu devre OTA (Operational Transconductance Amplifier- İşlemsel Geçiş İletim Yükselteci) ve CCII (Current Conveyor 2nd Generation-2.Nesil Akım Taşıyıcı) kullanılarak oluşturulmuştur. Frekansa bağlı olarak devrenin akım-gerilim karakteristiği gözlemlenmiştir [25].

2016 ve 2017 yıllarında M. Şahin ve arkadaşları tarafından yapılan çeşitli memristör uygulamaları yer almaktadır. 2016 yılında yapılan çalışmalarında memristör elemanının modellemesi LabVIEW platformunda gerçekleştirilmiştir. 2017 yılında ise memristör tabanlı kaotik bir devre modelinin üzerinde çalışılmıştır. Daha sonraları bu kaotik devre rastgele sayı üreteçleri için bir entropi kaynağı olarak kullanılarak sonuçları incelenmiştir.

Memristör tabanlı yüksek geçiren bir filtre uygulaması da Multisim-LabVIEW ortak platformunda modellenerek sonuçları analiz edilmiştir [26-28].

Adam ve arkadaşları 2017 yılında literatüre 3 boyutlu yeni bir memristör modeli üreterek, elemanın analog ve nöromorfik devrelerdeki davranışını incelemişlerdir [29].

Memristör tabanlı çalışmalar, memristör elemanının halen ticari üretilmemesinden dolayı simülasyon boyutunda devam etmektedir. Literatürde memristör ile ilgili çalışmalar elbette ki burada incelenenler ile sınırlı değildir. Fakat memristör ile ilgili geçmişten günümüze kadar araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalar, konunun ne kadar güncel olduğunu, araştırma ve geliştirmeye değer olduğunu göstermektedir.

1.2. Tezin İçeriği

Tezin ilk bölümünde, öncelikle tezin amacı hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca kapsamlı bir literatür taraması yapılarak, bu alanda yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde, memristör, memristör modelleri, memristörün yapımında kullanılan malzemler, temel memristör özellikleri ve memristörün analog ve dijital uygulamaları hakkında bilgiler verilmeye başlanmıştır.

Üçüncü bölümde, LabVIEW platformunda memristör modellemesi yapılmıştır. Bu memristör modeli için farklı frekanslarda akım-gerilim eğrisi incelenip ve yorumlanması yapılmıştır. Ayrıca yük-akı grafiği gösterilerek analiz edilmiştir. Memristör taklitçi devresi hakkında bilgiler verilerek Multisim ortamında modellemesi yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, pasif filtreler için bilgiler verilerek memristör tabanlı alçak ve yüksek geçiren uygulamaları Multisim platformunda yapılmıştır.

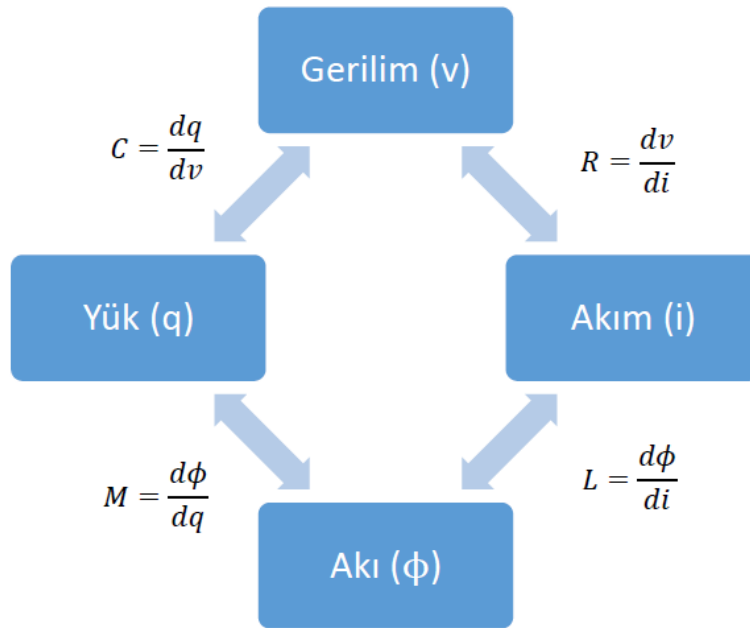
Beşinci bölümde, gerçekleştirilen çalışma ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışması; Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından FÜBAP-MF.14.11 no'lu proje ile desteklenmiştir.

2. MEMRİSTÖR

2.1. Giriş

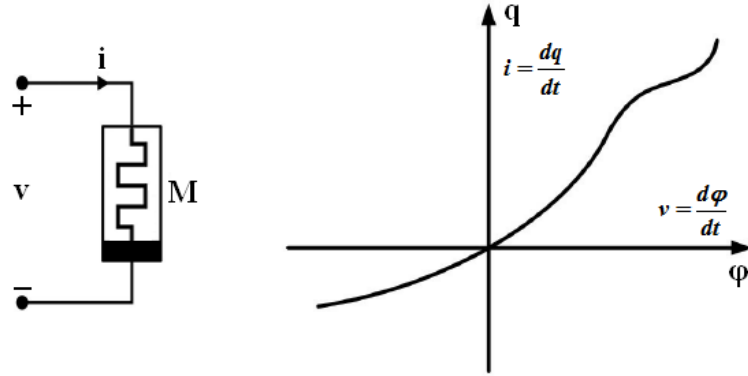
Klasik devre teorileri bakımından yük (q), akım (i), gerilim (v) ve manyetik akı (ϕ) olmak üzere dört temel devre değişkeni literatürde yer almaktadır. Bu değişkenler arasında bir takım ilişkiler vardır. Akım ile yük arasında ki ilişki $dq/dt=i$, manyetik akı ile gerilim arasında ki ilişki $d\phi/dt=v$ olarak tanımlanır. Üç temel devre elemanlarının tanımlanmasında kullanılan ilişkiler; rezistör $R=dv/di$, kapasitör $C=dq/dv$ ve indüktör $L=d\phi/di$ olarak ifade edilmektedir. Ancak manyetik akı ile yük arasındaki ilişki bu tanımlamalar arasında yoktur. Leon Chua, manyetik akı ile yük arasındaki ilişkiyi somutlaştırarak memristörün varlığını ileri sürmüştür. Şekil 2.1’de devre elemanları arasındaki ilişki ve eksik parçanın tamamlanması gösterilmiştir [1].



Şekil 2.1. Temel devre değişkenleri ve aralarındaki bağıntılar [1]

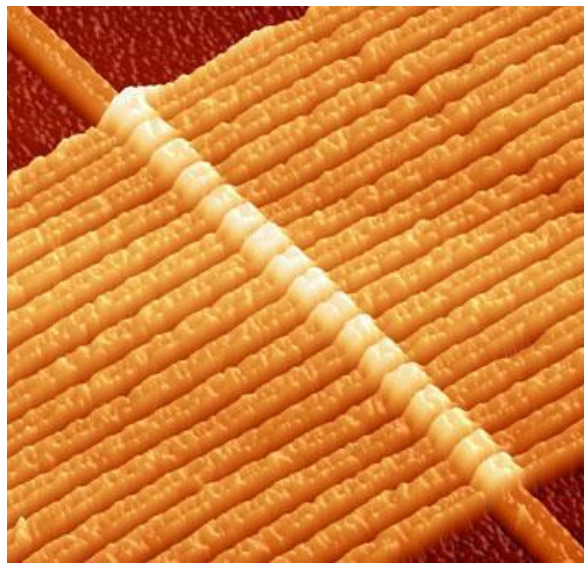
Üç temel pasif devre elemanları R , L ve C , doğrusal (lineer) davranış sergilemektedir. Ancak Chua’nın memristörü doğrusal olmayan (lineer olmayan) davranış sergilemektedir. Memristörün diğer elemanlardan farkı üzerinden bir yönde akım geçerken direnci artan, zıt yönde akım geçtiğinde ise direnci azalan rezistif bir eleman olmasıdır. Memristörün üzerinden geçen akım kesilip tekrar verildiğinde akım verilene kadar memristör aynı direnç

değerinde kalır. Bu durum memristörün bir hafızalı direnç olduğu (memory resistor) anlamına gelir ve memristör elemanı ismini de bu sözcüğün kısaltmasından almaktadır. Memristör direnci kendisine uygulanan gerilimin polaritesine, genliğine ve gerilimin zaman aralığına bağlı olan iki terminalli bir aygıttır. Şekil 2.2’de memristör elemanı modeli ve q - φ ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Memristör elemanı modeli ve q - φ ilişkisi [1]

Elektriksel yük ile manyetik akıyı ilişkilendiren memristör, yük ve akı arasındaki ilişkinin ifade biçimine göre iki şekilde ifade edilmektedir. Eğer yük ile akı arasındaki ilişki yükün (q) bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa yük-kontrollü memristör, akının (φ) bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa akı-kontrollü memristör olarak adlandırılır. Şekil 2.3 ise nano boyutlarda HP tarafından gerçekleştirilen memristör gösterimidir.



Şekil 2.3. Nano boyutlarda HP tarafından gerçekleştirilen memristör

2.2. TiO₂ Tabanlı Memristörler

Titanyum dioksit tabanlı memristör, ilk olarak HP Labs tarafından piyasaya sürüldü. Memristörün en popüler ve en çok atıfta bulunulan yapısı konumundadır. Aynı yapı, bazı değişikliklerle birlikte diğer araştırma gruplarında da üretilmektedir. Elektrotlar için farklı malzemeler seçilerek örnekler çoğaltılmaktadır. Aşağıda bu tipteki daha popüler yapıların Pt/ TiO₂ /Pt yapısı kısaca anlatılacaktır [30].

2.2.1. Pt/ TiO₂ /Pt Memristör

Memristörün bu tipi, TiO₂ tabakasının bir tarafının oksijen eksikliklerine sahip olduğu platinyum kontaktları arasında bulunan ince bir tabaka titanyum dioksitten oluşur. Temel olarak, saf halindeki TiO₂ iyi bir yarıiletken (3.0 / 3.2 eV band aralığı ile) 'dir; ancak ısıtıldığında, oksijen atomlarının bir kısmı, oksijen boşluklarının kafes içerisinde görünmesine neden olur. Bu malzemenin direncinde önemli bir düşüşe yol açar. Başka bir deyişle, oksijen sensörlerinin kullanılmasının nedeni metal gibi davranıyor ve çok iyi bir iletken haline geliyor olmasıdır. Oksijenin %3'ünü TiO₂'den uzaklaştırmak özelliklerini etkilemez. Ayrıca silikon ve gümüş gibi eksikliklere sahip diğer metal oksitler de kullanılabilir [30]. Şekil 2.4'de Pt/ TiO₂ /Pt yapısı gösterilmiştir.



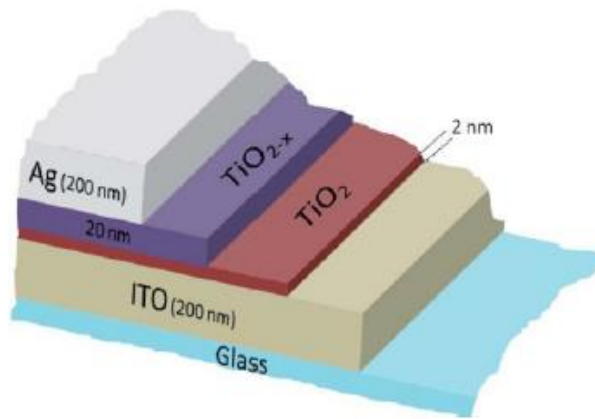
Şekil 2.4. Pt/ TiO₂ /Pt yapısı [30]

Dolayısıyla, geçiş maddesinin bir tarafında tabakanın yaratılması için oksijen yetersiz olduğundan, TiO₂ kristali tavlanarak işlem yapılmaktadır. Oksijenin sadece %0.1'i yapıdan (TiO₂-x) alınsa bile, yeterli iletkenlik oluşturulması mümkündür. Aslında, oksijen boşlukları n-tipi dopantlar veya pozitif yüklü iyonlar olarak hareket ederek şarj edilmektedir [31].

Burada memristöre bir gerilim uygulayarak oksit tabakasında kalıcı değişiklikler meydana getirilebilir (elektro-indirgeme yoluyla) ve iletken filamentler oluşabilir. Buna, şekillendirme adımı denir ve artık memristör kullanılmaya hazırdır.

2.2.2. Ag/ TiO₂/ITO Memristör

Kavehei üst ve alt elektrotlar için farklı malzemeler kullanarak başka bir memristör yaptı. Cihazlarını, indium ince oksit (ITO) ile süzülerek cam bir substrat (enzimlerin etki ettiği madde) üzerine imal ettiler. Platin yerine üst elektrot olarak gümüş (Ag) seçtiler. Bunun nedeni, iş fonksiyonu olup Ag'nin elektrot potansiyeli Pt'den daha düşük olduğundan, onu daha üretken bir malzeme haline getirir. Süreç cam zemin üzerine ITO katmanını desenlemek için kullanılan kimyasal aşındırma işlemi ile başlar. Daha sonra 60 dakika boyunca sabun, aseton ve izopropanol alkollü ultrasonik banyolar ile alt tabakanın temizlenmesi sağlanır. İki katmanlı TiO₂ ITO katmanının üzerine 2 nm kalınlığında çökeltme olmuştur. Bundan sonra, bir ALD vasıtasıyla, bir TiO_{2-x} tabakası 20 nm'lik kalınlığa sahip diğer TiO₂'nin üzerine çöktürülür. Sonunda, araçlarla termal buharlaştırmada, üst elektrod için 200 nm'lik bir Ag tabakası bırakılır [30]. Şekil 2.5'de bu modele ait şekil verilmiştir.



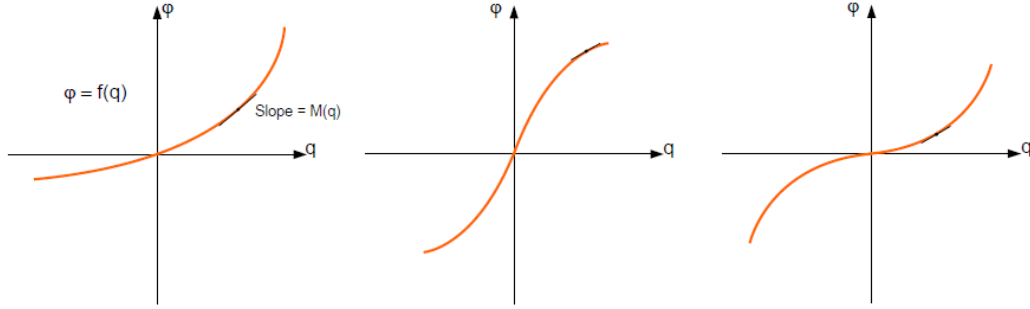
Şekil 2.5. Ag/ TiO₂/ITO memristör yapısı [30]

2.3. Memristör Yük-Akı İlişkisi

Q-φ eğrisinin monoton olarak artan bir özelliği vardır. Bu eğrisinin eğimi memristance M (q) 'dır. Dolayısıyla, memristance her zaman M (q) ≥ 0 pozitifdir. Pasiflik durumuna bağlı olarak, ancak memristance'in negatif olmayan bir değeri varsa memristör pasif bir unsurdur. Memristör tarafından dağıtık anlık güç şunlar tarafından verilir:

$$P(i) = M(q) i(t)^2 \quad (2.1)$$

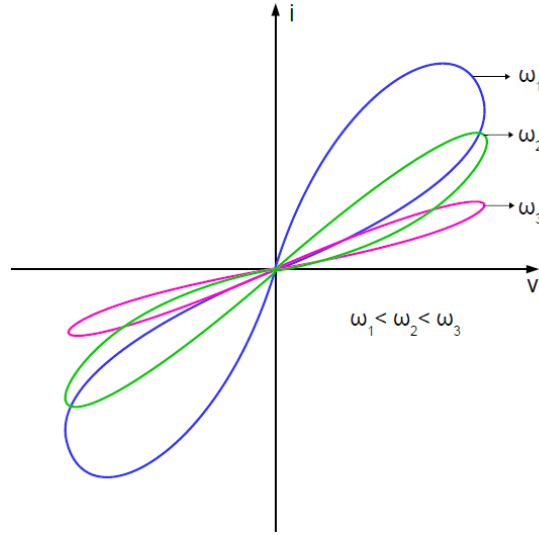
$M(q) \geq 0$ olduğundan, dağınık güç daima pozitifdir. Bu nedenle memristör pasiftir. Bu, enerjiyi yaratamaz veya depolayamaz, yalnızca enerji tüketir. Şekil 2.6'da memristörün bazı tipik q - φ özelliklerini gösterir.



Şekil 2.6. Memristörün, hepsinin monoton olarak artan özelliklere sahip üç yük-akı özelliği örnekleri [32]

2.4. Memristör Akım-Gerilim İlişkisi

Bir memristörün en önemli özelliği, akım-gerilim karakteristiği olup, burada sıkışmış histerezis döngüsüdür. Bir memristöre periyodik bir sinyal uygulayarak, gerilim sıfırsa, akım sıfır olur ve işlemin tersi de gerçekleşir. Dolayısıyla, hem gerilim $v(t)$, hem de akım $i(t)$ eğrileri daima orijini geçmektedir. Bir memristörün veya özellikli bir cihazın ana özellikleri, bir akım-gerilim histerezis eğrisine sahip olmaktır. Sıkışan histerezis döngüsünün şekli frekansla değişecektir. Frekansı arttırma histerezis döngüsünün küçülmesine neden olur ve Şekil 2.7'de buna ait grafik gösterilmiştir. Sonsuza doğru frekansı daha da arttırarak memristör normal direnç gibi davranacaktır [30].



Şekil 2.7. Memristörün farklı frekanslar için akım-gerilim ilişkisi [30]

2.5. Yük-Kontrollü Memristör ve Akı-Kontrollü Memristör

Elektriksel yük ile manyetik akıyı ilişkilendiren memristör, yük ve akı arasındaki ilişkinin ifade biçimine göre iki şekilde isimlendirilir. Eğer yük ile akı arasındaki ilişki yükün (q) bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa yük-kontrollü memristör, akının (φ) bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa akı-kontrollü memristör olarak adlandırılır.

Yük-kontrollü memristör ifadesi aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır:

$$\varphi = f(q) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'nin türevi alınırsa Eşitlik 2.3 elde edilir;

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{df(q)}{dq} \frac{dq}{dt} \quad (2.3)$$

Burada $v(t)=dw/dt$ ve $i(t)=dq/dt$ yazılarak düzenlenirse,

$$v(t) = M(q)i(t) \quad (2.4)$$

elde edilir ve $M(q)$, Eşitlik 2.5 ile tanımlanırsa:

$$M(q) = \frac{df(q)}{dq} \quad (2.5)$$

Akı-kontrollü memristör ifadesi aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır:

$$q = f(\varphi) \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.1'in türevi alınır;

$$\frac{dq}{dt} = \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.7)$$

Burada $v(t)=dw/dt$ ve $i(t)=dq/dt$ yazılarak düzenlenirse,

$$v(t) = M(\varphi)i(t) \quad (2.8)$$

elde edilir ve $M(q)$, Eşitlik 2.9 ile tanımlanır:

$$M(\varphi) = \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \quad (2.9)$$

2.6. Memristör Özellikleri

Memristör birçok özelliği ile diğer devre elemanlarından ayrılmaktadır. Eşitlik 2.3 ve Eşitlik 2.7 de verilen denklemler memristör ile direnç arasındaki farkı belirginleştirir ve memristöre çarpımsal transfer fonksiyonu, sıfırdan geçiş (zero-crossing) ve kalıcı hafıza (non-volatile memory) gibi özellikler kazandırır [28]. Burada, herhangi bir zamanda memristör elemanının çıkışı; giriş ile memristansı temsil eden lineer olmayan bir fonksiyonun çarpımına eşit olmakta ve giriş sıfır olduğu zaman çıkış da sıfıra gidecektir.

Eşitlik 2.3 ve 2.7'de q ve φ 'nin akım ve gerilim cinsinden zamana göre integralleri yazılarak aşağıdaki denklemler elde edilir:

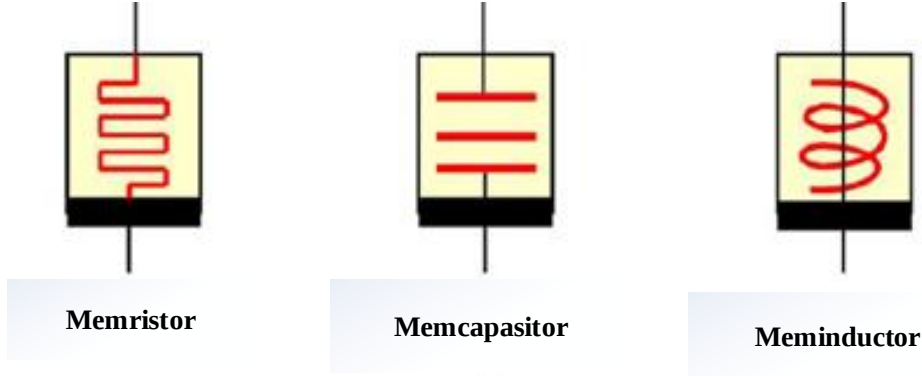
$$q = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad \text{ve} \quad \varphi = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (2.10)$$

$$v(t) = M\left(\int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau\right) i(t) \quad (2.11)$$

$$i(t) = W\left(\int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau\right) v(t) \quad (2.12)$$

Yukarıdaki denklemler incelendiğinde Eşitlik 2.9 ve 2.10 analiz edilerek memristörün kalıcı hafıza özelliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Memristans ve memdüktransın değeri giriş sinyalinin bir önceki değerleride hesaba katılarak bulunur. Giriş sinyali uygulandığı periyot boyunca memristans (memdüktrans) değişimini koruyacaktır. Fakat giriş sinyali verilmezse bir süre sonra, yeniden giriş sinyali uygulanana kadar son anda bulunduğu değerini korumaya devam edecektir. [28].

Chua ve Kang tarafından memristör özellikleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır [1-2]. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.8. Memristif sistemlerde aygıtların temsilleri

- **Pasiflik Kriteri:** Pasiflik kriteri diğer elemanlar gibi gücün sıfıra göre eşit veya büyük olmasına göre yorumlanmaktadır. Eğer $M(q)$ memristansı negatif olmayan değere sahipse yani $M(q) \geq 0$ ise, memristörün ϕ - q eğrisi pasiftir. Memristörün anlık güç kaybı $p(i) = M(q)[i(t)]^2$ denklemiyle ifade edilir. $M(q) \geq 0$ olduğunda anlık güç her zaman pozitifdir dolayısıyla memristör pasif bir elemandır [1, 28].

- **Sıkıştırılmış Histerezis Döngüsü:** Sıfır noktasında merkezlenmiş bir sinüzoidal uyarım altında tam anlamıyla pasif olan bir memristör her zaman histeretik i - v karakteristiğine sahip olur. Yani memristöre periyodik bir sinyal uygulandığında, gerilim sıfır ise akım da sıfır olur ve bunun zıttı da doğrudur [1, 5, 28].

- **Lineer Karakteristik Sınırlaması:** Periyodik bir sinyal ile birlikte pasif bir memristör elemanı frekans arttırılarak sonsuza yaklaştığında lineer direnç elemanı gibi davranır. Bunun sebebi memristörün veya memristif elemanın histerezis özelliği gösteren i - v eğrisinin frekans ile değişmesidir. Frekans arttıkça histerezis eğrisi daralmakta, frekans arttırılarak sonsuza yaklaştığında ise memristör normal bir direnç gibi davranmaya başlamaktadır [28].

- **Varlık ve Teklik Teoremi:** Pozitif artan lineer olmayan bir fonksiyonla karakterize edilen pasif bir memristör elemanına sahip her sistemin tek cevabı vardır [1].

2.7. Memristör Modelleri

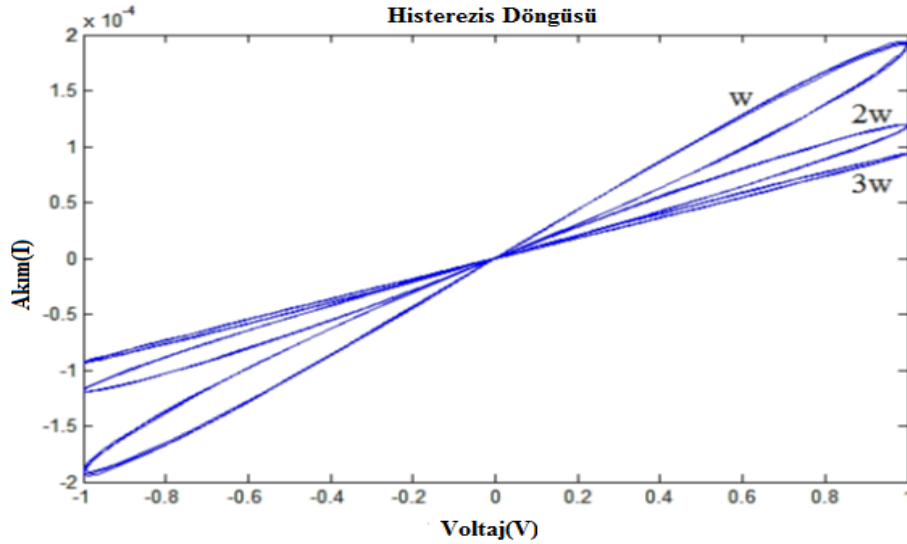
2.7.1. Lineer Sürüklenme Modeli

HP ekibinin kullandığı denklemler incelenerek analiz edilirse sonuç olarak Eşitlik 2.18'de $Q_D = D^2 / (\mu_D R_{ON})$ olarak alınırsa memristif sistemin dahili durum değişkeni:

$$x(t) = (1 - \sqrt{1 - 2\mu_D / D^2 R \varphi(t)}) \quad (2.13)$$

$$i(t) = v(t) / R_{off} (\sqrt{1 - 2\mu_D / D^2 R \varphi(t)}) \quad (2.14)$$

D kalınlığı ile memristance arasında Eşitlik 2.14 incelendiğinde karesel ters orantı vardır. Sonuç olarak daha küçük D kalınlığı daha iyi memristans karakteristiğini göstermektedir. Şekil 2.9'da memristörün bu model için üç farklı frekans değerinde yapılan benzetim sonucu gösterilmiştir. Başlangıç değerleri HP ekibinin kullandığı değerler $D=10nm$, $R_{ON}=100\Omega$, $R_{OFF}=16K\Omega$, $v_0=1V$, $\mu_0=10^{-10}cm^2s^{-1}V^{-1}$ alınarak ve girişe sinüzoidal bir dalga uyarlanırsa Şekil 2.9'daki sonuç görülür [30]. Buradan da açıkça görülebildiği gibi frekans arttıkça histerezis döngüsü daralmakta ve lineerliğe yaklaşmaktadır.



Şekil 2.9. Üç farklı frekans değeri için memristörün lineer sürüklenme modeli [3]

HP ekibinin bu çalışmasından sonra 2009 yılında Joglekar ve Wolf lineer sürüklenme modeline memristörün polaritesini de eklemişlerdir. $\eta=\pm 1$ ile ifade edilen polaritede katkılanmış bölge genişliyoorsa $\eta=+1$, daralıyorsa $\eta=-1$ değerini almaktadır [28]. Buna göre Eşitlik 2.16 yeniden yazılırsa:

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \eta \frac{R_{on}}{\beta} i(t) \quad (2.15)$$

Bu modelin denklem adımlarına göre yeniden uyarlanırsa aşağıdaki denklem elde edilir,

$$i(t) = v(t)/R_{off}(\sqrt{1 - \eta(2\mu_D/D^2 R \varphi(t))}) \quad (2.16)$$

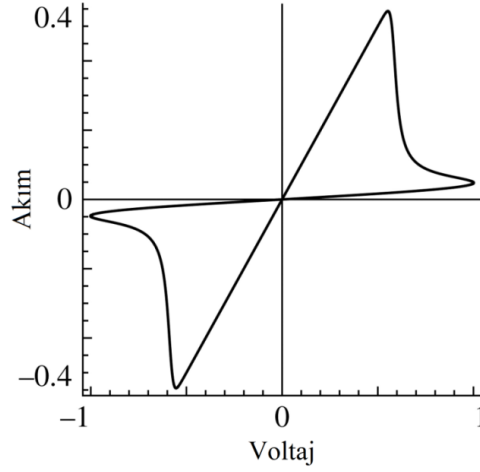
2.7.2. Nonlinear Sürüklenme Modeli

Lineer sürüklenme yaklaşımının sınır değerlerinde, yani katkılanmış bölge ile katkılanmamış bölge arasındaki kısım $[0, D]$, ortaya çıkardığı bir takım sorunları gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Memristöre çok küçük boyutlarda uygulanan birkaç volt, iyonik taşınımında önemli bir lineer olmayan yapı oluşturarak büyük bir elektrik alan oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, enerji bariyerinde hızlı ve önemli bir azalmaya sebep olmaktadır [28-33]. İyon sürüklenme hızı sıfıra yaklaştığında ve memristör direnci ON veya OFF durumuna ayarlıyken, harici hiçbir uyartım memristör durumunu değiştirememektedir.

Ortaya çıkan sorunun üstesinden gelmek için pencere fonksiyonu (window function) yaklaşımı geliştirilerek, durum denklemlerinde bu lineer olmayan özellikte göz önüne alınmıştır ve birçok farklı pencere fonksiyonu literatüre sunulmuştur [3,28,33,34].

Eşitlik 2.17’de gösterildiği gibi $F(\xi)$ pencere fonksiyonu genel olarak sağ tarafa çarpım olarak eklenir ve denklem düzenlenirse,

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \eta \frac{R_{on}}{\beta} i(t) F(\xi) \quad (2.17)$$



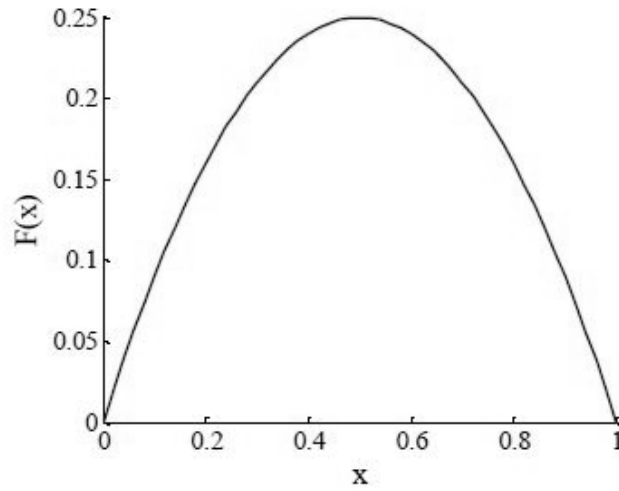
Şekil 2.10. Nonlineer sürüklenme modelinin kullanıldığı histerezis döngüsü [33]

Bu denklemde ζ değişken bir vektördür. Denklemde i akımı ile w sınır değerine bağlı olarak $\zeta = (w, i)$ şeklinde ifade edilebilir. Pencere fonksiyonunun kullanılması ile nonlineer sürüklenme yaklaşımında sınır şartları daha yüksek lineer olmayan yapıya sahiptir. Şekil 2.10'da bu durum gösterilmiştir.

2008 yılında Strukov vd. pencere fonksiyonunu ilk olarak lineer sürüklenme modelinin yanında sunmuşlardır. Bu fonksiyona ait grafiği Şekil 2.11'de gösterilmiş olup denklemi aşağıdaki gibidir [2]:

$$F(x) = x(1 - x) \quad (2.18)$$

şeklindedir ve $x=w/D$ 'dir. Eşitlik 2.18 için sınır şartları literatürde bu şekilde kabul edilmiştir $F(0)=0$ ve $F(D)\approx 0$ 'dır. Bu sınır şartlarında $dw/dt=0$ olduğu için hiçbir harici alan memristörün sınırını değiştiremez ve bu önemli bir problemdir. Bir diğer problem ise pencere fonksiyonu memristörün yük miktarını hatırladığını varsayar. Ancak anlaşıldığı gibi memristör sınır şartlarını hatırlarken yük miktarını hatırlamayacaktır [35].



Şekil 2.11. Strukov vd. tarafından önerilen pencere fonksiyonunun grafiği [3].

Bir diğer pencere fonksiyonu Strukov vd. tarafından sunulan fonksiyondan biraz farklı olarak Benderli ve Wey tarafından 2009 yılında sunulmuş ve eşitlik aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [36].

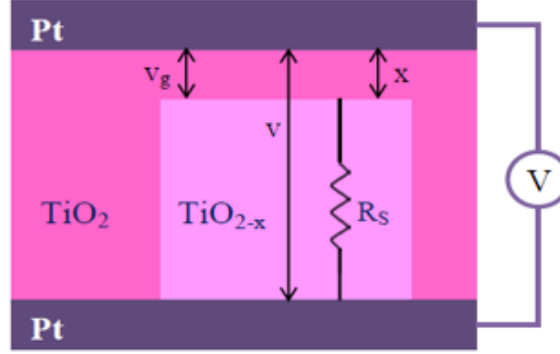
$$F(x) = x(D - x) \quad (2.19)$$

$x=w/D$ 'dir ve Eşitlik 2.19 için sınır şartları $F(0)=0$ ve $F(D)=0$ 'dır. Bu durumda pencere fonksiyonu her iki sınır şartını da sağlar. Ancak benzer olan bu iki fonksiyonun bir başka problemi de $0 < w < D$ olduğunda lineer sürüklenme yaklaşımının modellenmesidir.

2.7.3. Simmons Tünel Bariyer Modeli

Lineer ve nonlinear iyon sürüklenme modellerinde katkılanmış ve katkılanmamış olmak üzere iki bölge vardır ve bu modeller seri bağlı iki direnç ile modellenmiştir. Pickett vd. bu modellere kıyasla daha doğru bir fiziksel model sunmuştur. Bu modelde seri bağlı iki direnç yerine Şekil 2.12'de gösterildiği gibi bir direnç ile seri bağlı bir elektron tünel bariyeri bulunmaktadır [28]. Bu model iyonlaşmış katkılayıcı hareketlerinin eksponansiyel doğası nedeniyle yani durum değişkenindeki değişimle nonlinear ve asimetric anahtarlama karakteristiği sergilemektedir. Simmons tünel bariyer modelinde durum değişkeni x ile ifade edilmektedir [15]. x 'in türevi ise oksijen boşluklarının sürüklenme hızı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} C_{off} \sinh\left(\frac{i}{i_{off}}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{x-a_{off}}{w_c} - \frac{|i|}{b}\right) - \frac{x}{w_c}\right], & i > 0 \\ C_{on} \sinh\left(\frac{i}{i_{on}}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{x-a_{on}}{w_c} - \frac{|i|}{b}\right) - \frac{x}{w_c}\right], & i < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$



Şekil 2.12. Simmons tünel bariyer modeline dayanan fiziksel memristör yapısı [37].

Şekil 2.12’de gösterilen modele ait kavramlar: V : cihaza uygulanan gerilim, v : cihazın dahili gerilimi, v_g : tünelleme bariyer gerilimi veya katılanmamış bölgenin gerilimi, x : tünelleme bariyer genişliği, R_s : kanal direncidir. Simmons modeli en doğru model olarak iddia edilse de oldukça karmaşık bir modeldir. Akım-gerilim ilişkisi net olmadığından hesaplaması zordur.

2.7.4. Eşik Uyarlamalı Memristör (TEAM) Modeli

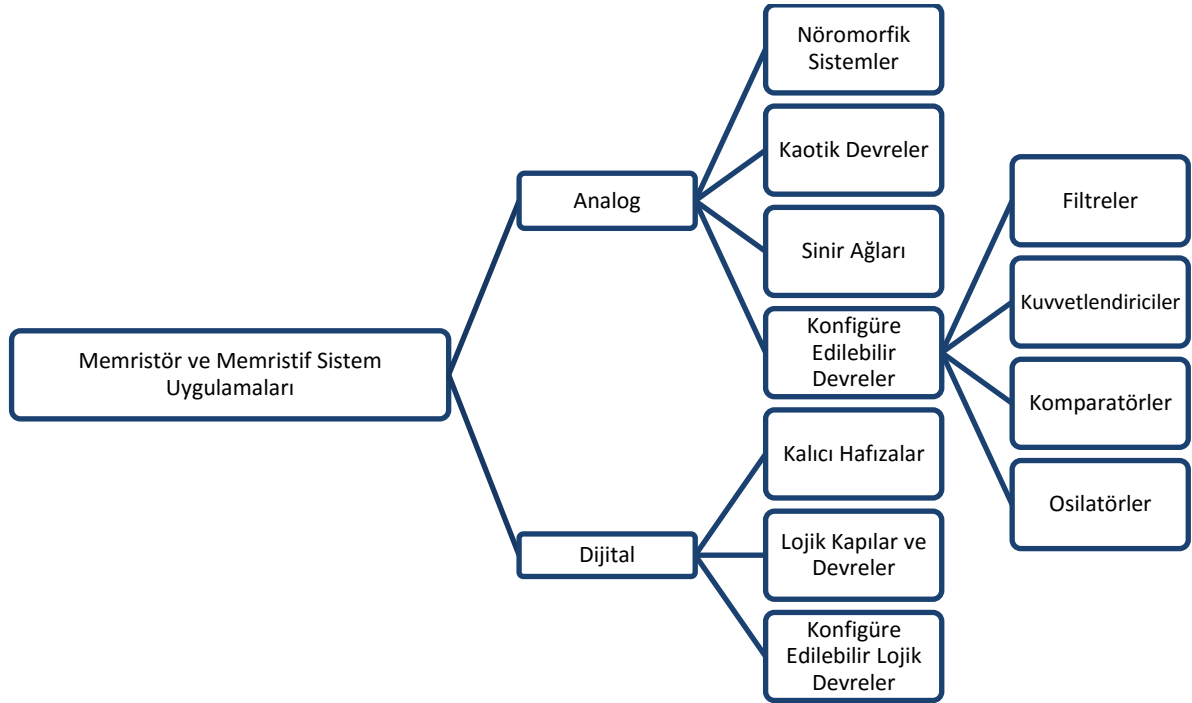
Kvatinsky vd. tarafından önerilen basit ve genel bir model olan TEAM (Threshold Adaptive Memristor) literatüre sunulmuştur [16]. Bir önceki modele göre daha basit eşitliklere sahiptir ve bu yönüyle daha kolay hesaplama olanağı sunmaktadır. Bu modelde denklemler indirgenirken aşağıdaki kabuller yapılmıştır [28]:

- Belli bir eşik altında durum değişkeninde değişim yoktur.
- Memristör akımı ve durum değişkeninin türevi eksponansiyel ilişki yerine polinomal ilişki ile tanımlanır.

2.8. Memristör Uygulamaları

Memristörün icadı ve fiziksel yapımı sonrası, bilimsel çevrede ve mühendislik alanı gibi çeşitli uygulama alanlarında bu cihazın kullanıldığı uygulamaları bulmak için çalışmalar başlamıştır. Memristörün küçük boyutu, düşük enerji tüketimi, anahtarlama özelliği, sinaps-

benzeri davranışı, diğer elemanlardan farklı bir özelliği olan hafıza özelliğinin olması gibi birçok özelliğinin sonucu olarak literatüre birçok çalışma sunulmuştur [28].



Şekil 2.13. Memristör ve memristif sistem uygulamaları

2.8.1. Analog Uygulamaları

Memristör yapısı itibariyle nöromorfik sistemlerin uygulamalarına uygun olarak nöronları modelleyerek nöral yapıları taklit eden analog-dijital sistemlerdir. Burada nöronları birbirine bağlayan sinapsları modellemek için düşük güç tüketimi, esneklik ve dinamik hafıza gerektirmektedir. Memristör düşük güç tüketimi, kalıcı ve ayarlanabilir direnç hafızası özellikleriyle bahsedilen problemleri çözmek adına önemli bir rol oynamaktadır. Kazanç kuvvetlendiriciler, analog filtreler, osilatörler ve Schmitt tetikleyici (üçgen ve kare dalga üreten iki konumlu devre) gibi devreler bu çalışmalara örnek olarak verilebilir [28].

Analog elektronikte memristör tabanlı diğer uygulamalar ise kaotik devreler ve sinir ağlarıdır. Memristörün lineer olmayan özelliği kullanılarak tasarlanan kaotik devreler tasarlanmakta ve haberleşme sistemleri için uygun olmaktadır. Ayrıca memristörün hafıza özelliğinden faydalanılarak memristör tabanlı sinir ağlarında bu eleman kullanımı ön görülmektedir.

2.8.2. Dijital Uygulamaları

Memristör elemanının küçük boyutlarda olması bu elemanın en önemli özelliklerinden biri olmaktadır. Buna bağlı olarak anahtarlama özelliği, durumunu korurken güç harcamaması ve anahtarlama sırasında düşük enerji tüketmesi gibi özellikleri kullanılarak geliştirilebilecek memristör tabanlı dijital uygulamalar; kalıcı hafızalar (genellikle crossbar yapılar şeklinde), mantık devreleri konfigüre edilebilir.

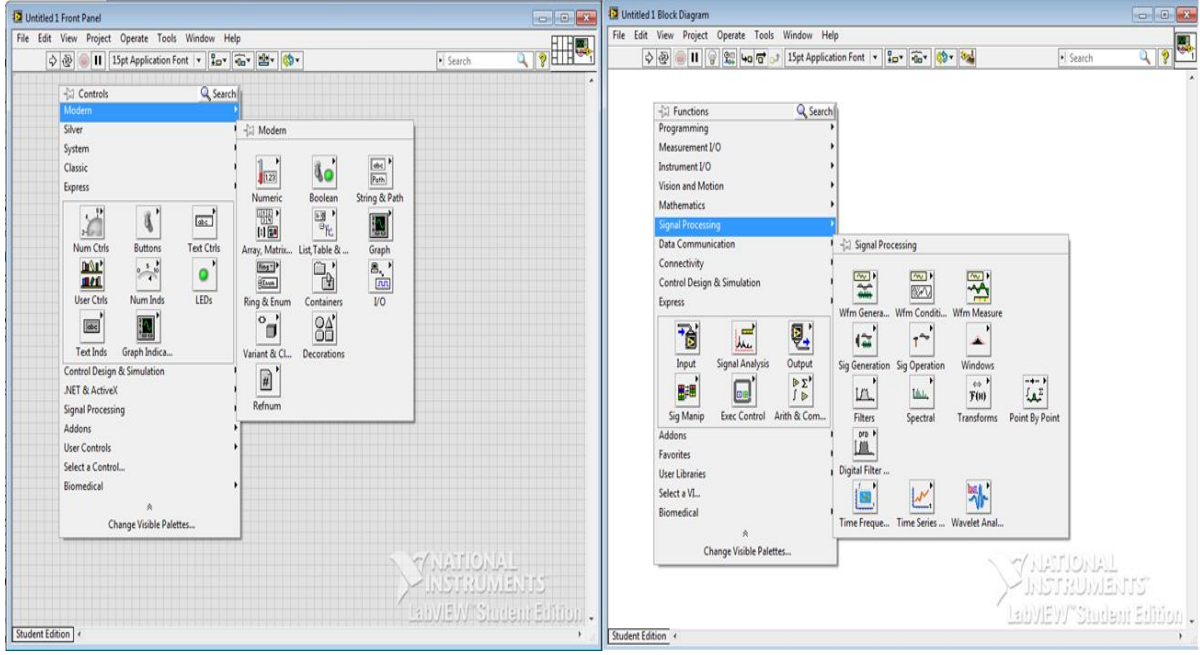
3. LabVIEW PLATFORMUNDA MEMRİSTÖR MODELLEME

3.1. LabVIEW

LabVIEW, Amerikan National Instruments firmasının geliştirmiş olduğu grafik tabanlı yazılım platformudur. Mühendislik uygulamaları ve sinyal işleme konularında sıklıkla kullanılmakta olan bu program geleneksel metin tabanlı programlama dillerinden farklı olarak görsel bir programlama diline sahiptir [25-26]. Görsel olmayan bir yapıya sahip metin tabanlı dillerde editör ara yüzü ve komutlar tamamen metinlere dayalı olarak oluşturulmaktadır. Daha sonra geliştirilen nesne tabanlı diller görsel diller ile birçok komutu yazmaya gerek duymadan bir takım seçenek grupları ile yapılan ayarlamalar sonucu program yazmak mümkün hale gelmiştir. Görsel programlama dili olarak ifade edilen bu diller ile tamamen kod yazma ve komut öğrenme zorunluluğu ortadan kalkmamıştır. Amerikan National Instruments firmasının LabVIEW programını geliştirmesiyle içinden veri akan hatlar yardımıyla fonksiyonel noktaları birbirine bağlayarak, bir grafik gösterim üzerinden program yapabilmek mümkün hale gelmiştir [25]. Bu program sayesinde birçok komut ikon haline getirilmiş olup, veri akışı animasyon şeklinde canlandırılabilmekte ve yazılım grafiksel olarak tasarlanabilmektedir.

LabVIEW programının görünümü ve işlemleri osiloskop, multimetre gibi fiziksel elemanları örnek aldığından dolayı sanal enstrüman (SE) olarak adlandırılır. Her SE kullanıcısı, ara yüzünden veya diğer kaynaklardan ve bilgi aktarımı sağlayan diğer dosya veya bilgisayarlardan oluşan girişleri, fonksiyonları kullanarak programı kolaylıkla yönetebilir. LabVIEW ile programlama mantığı, program kodu yazılan programlama mantığına benzerdir.

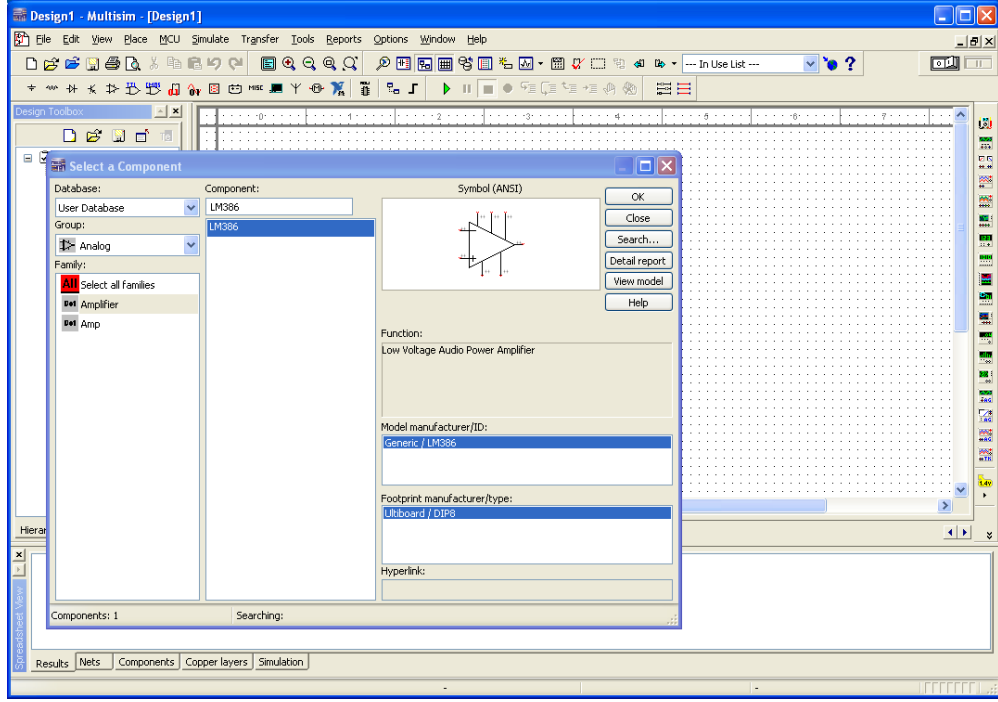
SE programı ön panel (front panel) ve blok diyagramı (block diagram) olmak üzere iki kısımdan oluşur. Blok diyagramı, geleneksel programlardaki kod yazma bölümüne denk gelmektedir. Ön panel ise kullanıcı ara yüzünün hazırlandığı SE içerisindeki giriş ve çıkışlara bağlı kontrolör ve göstericilerin düzenlenebildiği bölümdür. Kontrol araçları butonlar, kadranlar, anahtarlar ve diğer giriş araçlarından oluşur. Grafikler, ledler ise göstericileri oluşturur. Ön panel ve blok diyagramda, kontrol ve fonksiyon paleti olmak üzere iki önemli palet vardır. Şekil 3.1’de ön panel, blok diyagram, kontrol ve fonksiyon araçları verilmiştir.



Şekil 3.1. LabVIEW programının ön paneli (front panel) ve blok diyagramı (block diagram)

3.2. Multisim

National Instruments devre tasarım ortamının benzetim uygulamaları ve şema oluşturma, devre tasarım akışındaki esas adımların uygulanmasında yardımcı olan EDA (Electronics Design Automation) araçlarının ortamı Multisim'dir. Multisim şema giriş, benzetim ve PCB (Baskı Devre Kartı) tasarımı gibi aşamaları besleme için tasarlanmıştır. Multisim'in kullanıcı arayüzü aşağıdaki temel elemanları içerir. Tasarlayacağımız modeller için Multisim 14 versiyonu kullanılmıştır. Bu programa ait devre çizim şeması Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



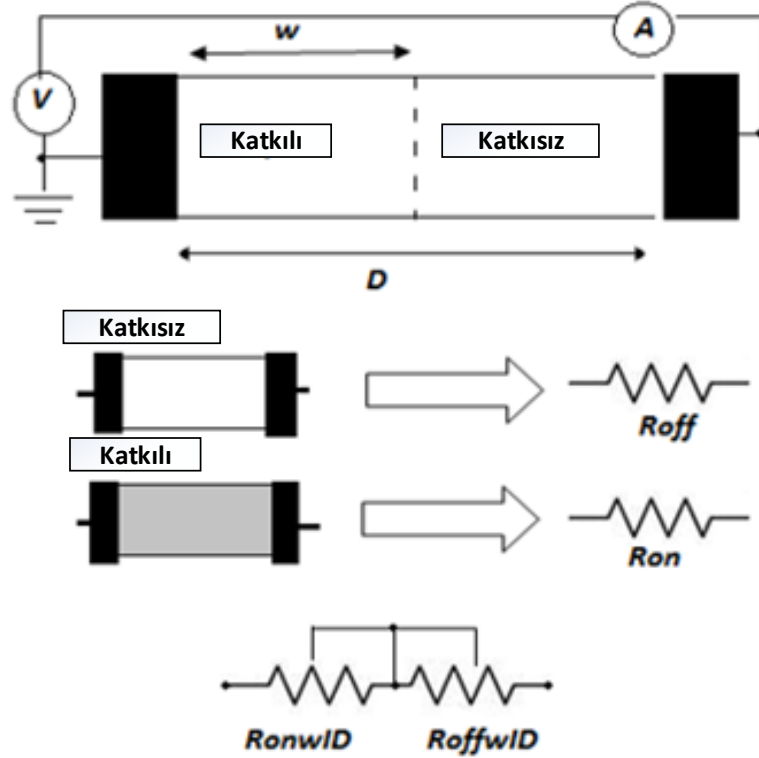
Şekil 3.2. Multisim programının panel görüntüsü

3.3. Lineer Sürüklenme Modelinin LabVIEW Ortamında Gerçeklenmesi

Memristörün fiziksel olarak halen laboratuvar ortamında bulunmasından dolayı bu elemanın benzetimi araştırmacılar için oldukça önemlidir. Çünkü bu modellerle teorik bilginin doğruluğu ve geçerliliği analiz edilmektedir. Diğer yandan parametre değişimi ile veya model yapısındaki değişim ile nasıl bir cevap alınacağı da gözlenebilmektedir. Daha sonra ise deneysel çalışmalar için bir alt yapı oluşturularak sonuçlar hakkında fikir verecektir. Ancak memristörün ticari üretimi henüz mümkün olmadığından, literatürde deneysel çalışmalar için memristör davranışını taklit eden taklitçi devreleri sunulmuştur [38-39]. Taklitçi devrelerinin literatürde yer almaya başlamasıyla memristör tabanlı birçok sistemin bu taklitçi devre ile tasarımı ve gerçekleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Memristör tabanlı sistemlerin tasarımı, test edilmesi ve doğrulanması süreçlerinde de bu taklitçi yapılar yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde öncelikle literatürde yer alan memristör modeli LabVIEW platformunda control&simulation kısmında modellenecek ve sonuçları analiz edilecektir. Daha sonra analog uygulama için kullanılacak memristör taklitçi devresi hakkında bilgi verilip Multisim ortamında modellenmesi yapılacaktır.

3.3.1. Memristör Modellemenin Matematiksel İfadesi

Matematik modellerinin çıkarılması memristör kavramının daha iyi anlaşılabilmesi ve benzetimlerinin uygulanabilmesi için gerekmektedir. Memristörün HP laboratuvarına göre geometrik şekli Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Burada memristör katkılı ve katkısız kısım olarak iki bölümden oluşmaktadır. Katkısız kısmın direnci R_{off} , katkılı kısmın direnci ise R_{on} olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 3.3. Memristörün HP laboratuvarına göre geometrik şekli

Parçanın kalınlığı D , oksijen katkılı kısım (doped) w , oksijen katkısız kısmın direnci R_{off} , katkılı kısmın direnci ise R_{on} ile gösterilmektedir. Memristörün akımı ve gerilimi arasındaki ilişkiyi Ohm kanunu ile ifade edersek:

$$v(t) = R_{mem}(x)i(t) \quad (3.1)$$

Burada R_{mem} memristörün toplam direncini temsil etmekte (katkılı ve katkısız kısım), ve $x=w/D$ Ohm yasası dışında üzerinden geçen akım ile x durum ifadesi arasındaki bağıntıyı tanımlarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\frac{dx}{dt} = kf(x)i(t), \quad k = \frac{\mu_V R_{ON}}{D^2} \quad (3.2)$$

$\mu_V \approx 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ katkılı kısım hareketliliği olarak adlandırılır.

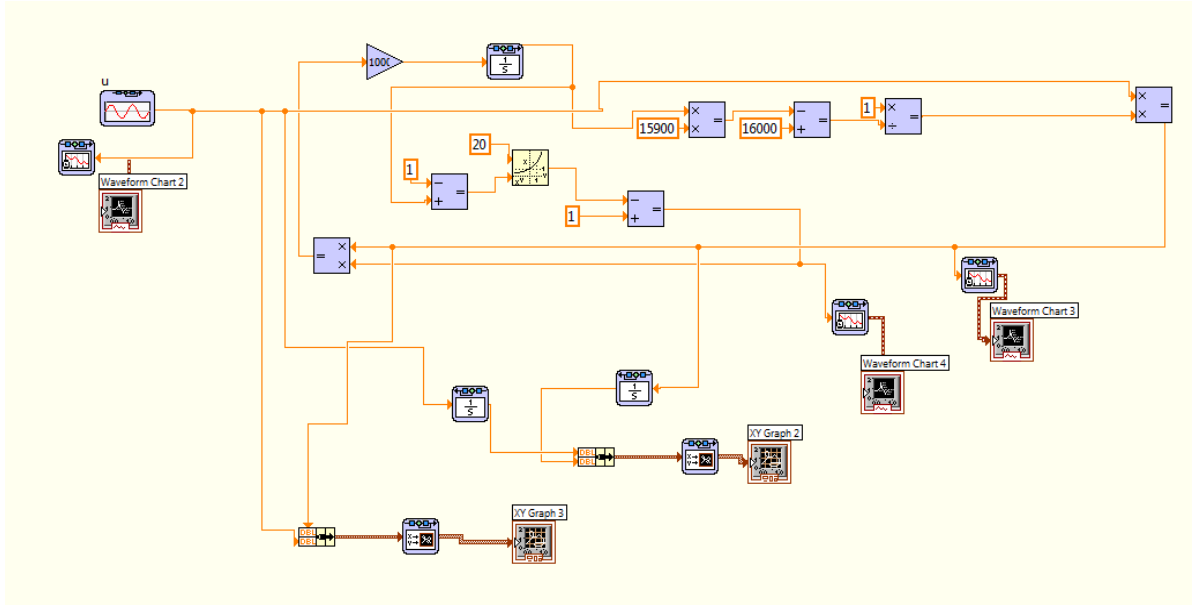
Memristör direncinin değerinin sınırlarını $w=0$ ve $w=D$ aralığında hesaplarız ve buda R_{off} ve R_{on} direnç değerlerini ifade eder.

$$R_{mem}(x) = R_{on}x + R_{off}(1 - x) \quad (3.3)$$

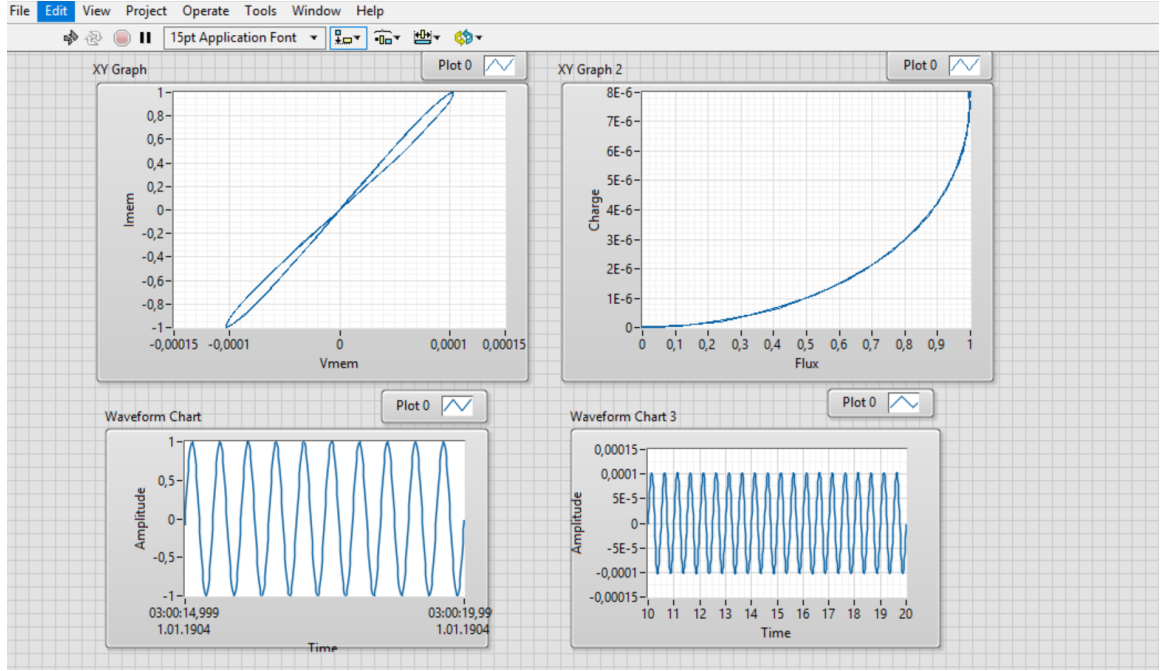
Denklem 3.4'de tanımlanan $f(x)$ fonksiyonu için literatürde birçok ifade mevcuttur ve bunlardan birisi aşağıdaki gibi tanımlanarak uygulamamızda kullanılmıştır.

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki matematiksel denklemler yardımıyla ve literatürde en çok kullanılan parametre değerleri kullanılarak LabVIEW programında gerçekleştirilen memristör modeli Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

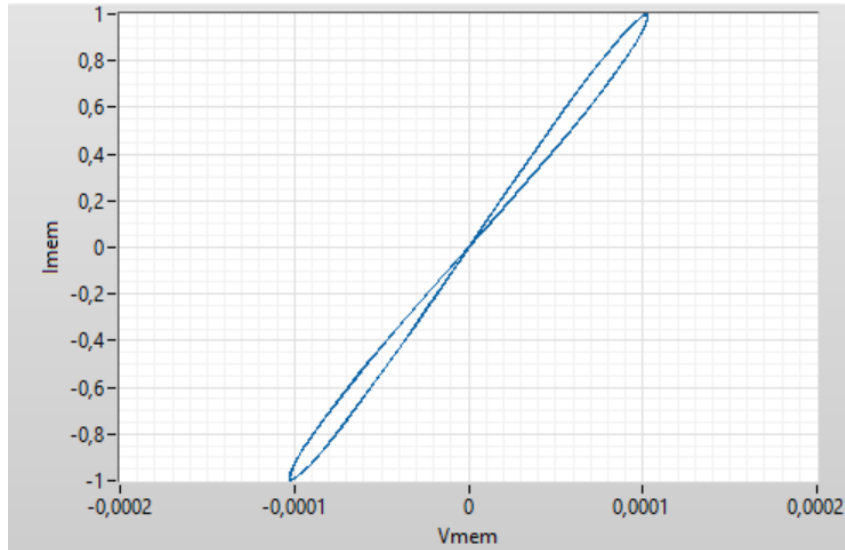


Şekil 3.4. LabVIEW ortamında gerçekleştirilen memristör modeli

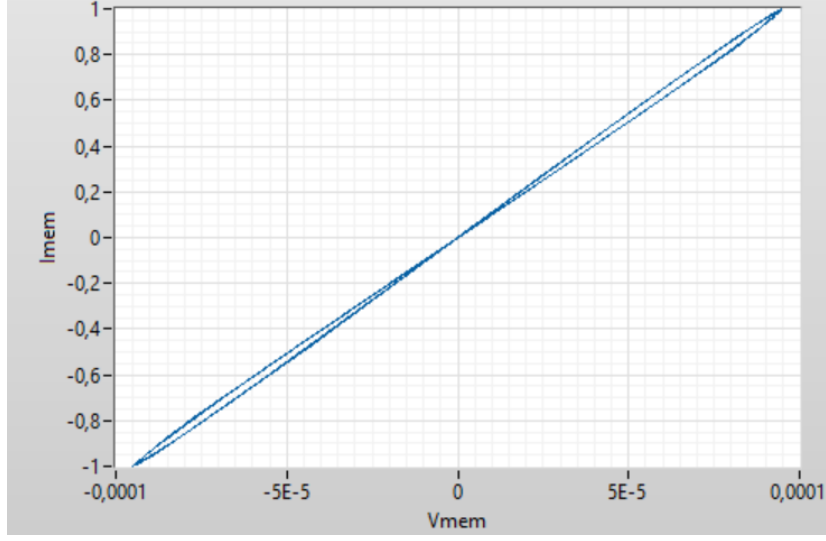


Şekil 3.5. LabVIEW ortamında gerçekleştirilen memristör modeli ön paneli

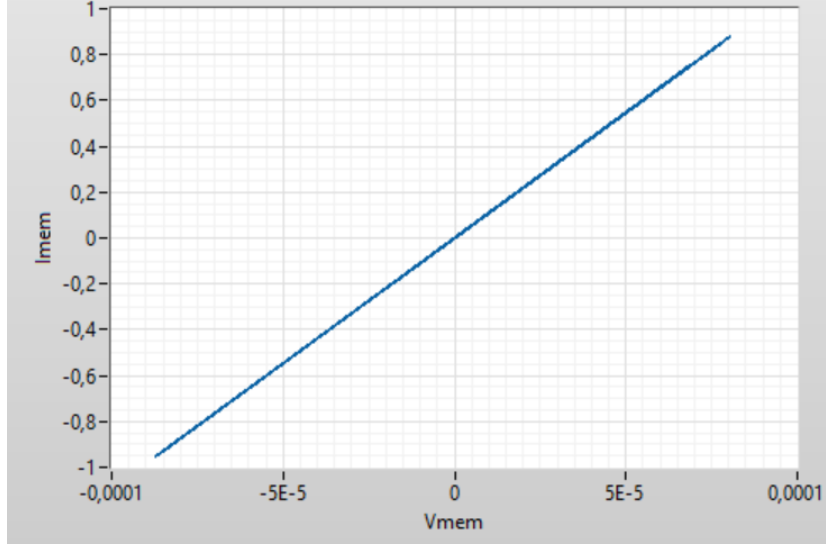
Şekil 3.4’de gösterilen LabVIEW ortamında kurulan memristör modeline uygulanan giriş sinyali 1V gerilime ve 20Hz frekansına sahiptir. Şekil 3.5’de ise LabVIEW ortamında oluşturulan devrenin ön panel şekli gösterilmiştir. Bu giriş sinyali için memristörün akım-gerilim grafiği Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Memristörün histerezis çevrimi 1V-20Hz için

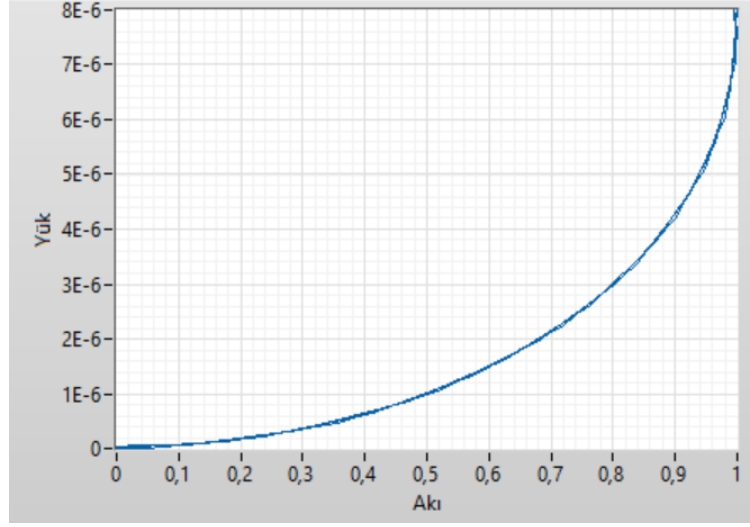


Şekil 3.7. Memristörün histerezis çevrimi 1V-100Hz için



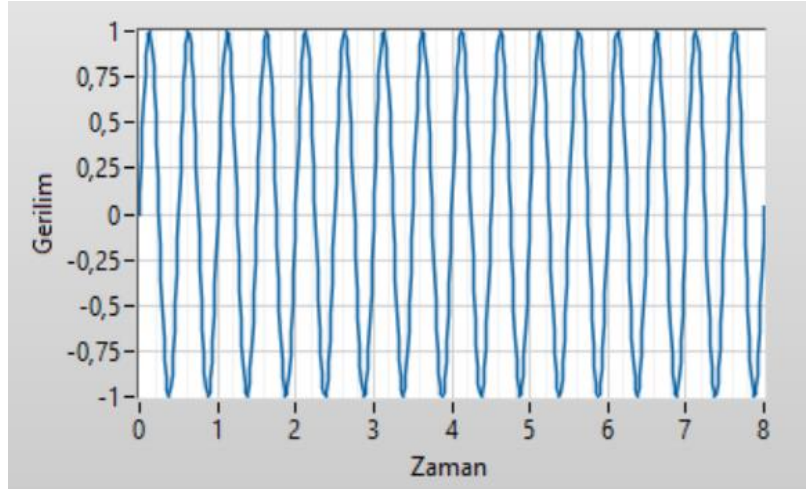
Şekil 3.8. Memristörün histerezis çevrimi 1V-500Hz için

Frekansın daha da arttırılması ile memristör doğrusal bir direnç benzeri davranmaya başlar ve Şekil 3.7’de bu durum görülmektedir. Şekil 3.8’de $f=500\text{Hz}$ için elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir ve buna ait histerezis eğrisinden doğrusal bir direnç gibi davrandığı görülmektedir.



Şekil 3.9. Memristörün yük-akı grafiği 1V-20Hz giriş sinyali için

Memristöre ait yük ve akı arasındaki ilişkiyi 1V-20Hz giriş sinyali için gösteren grafik Şekil 3.9’da verilmiştir. Aralarında lineer olarak artan bir ilişki mevcuttur. Şekil 3.10’da memristöre ait gerilimin zamana göre grafiği verilmiştir.

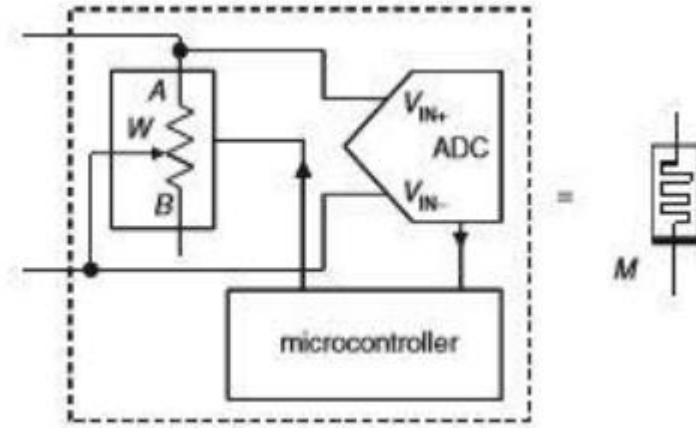


Şekil 3.10. 1V-20Hz V_{mem} geriliminin grafiği

3.4. Memristör Taklitçi Devresi

Hâlihazırda memristörün tek bir eleman olarak bulunmaması ve henüz bir üretim standardının olmaması bilim insanlarını memristör taklitçi devrelere yöneltmiştir. Memristör taklitçi devreleri, temel olarak mevcut devre elemanlarıyla memristörün akım-gerilim karakteristiğini gösteren, memristif davranışlar sergileyen bir devre tasarlanması fikrine dayanır. Memristör modellerinin fiziksel donanım hali olarak düşünülebilir. Bu

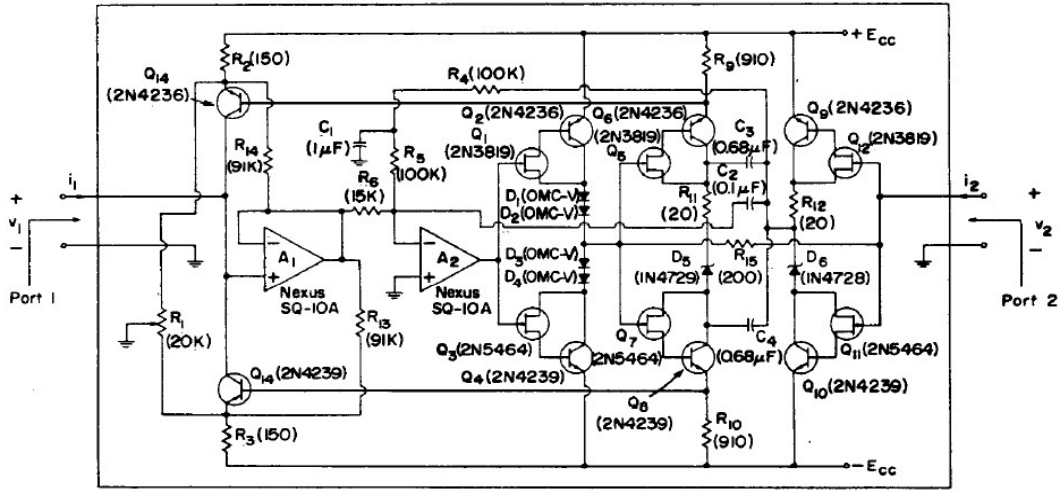
bağlamda bilinen ilk memristör taklitçi devresi Pershin ve Di Ventra tarafından geliştirilmiştir [40]. Bu devre, memristörü modellemek için bir adet dijital potansiyometre, bir adet analog-dijital çevirici ve bir adet mikro denetleyici ile oluşturulmuştur. Şekil 3.11’de bu taklitçi devre verilmiştir.



Şekil 3.11. Memristör Taklitçi Devresi [40]

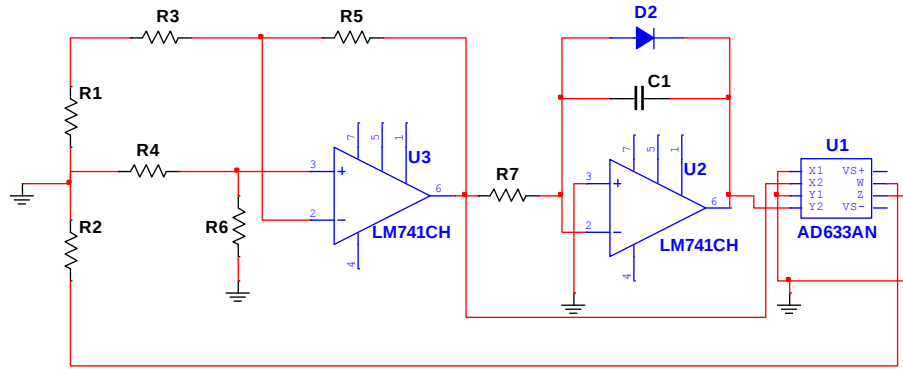
Memristörün fiziksel olarak devrelere uygulanması için taklitçi devrelerinin geliştirilmesi önemli bir gelişmedir. Bu aynı zamanda memristörün donanımsal olarak devrelere uygulanmasının önünü açmış ve böylece elemanın fiziksel devrelerde nasıl davranış gösterdiğini görebilmek adına önem arz etmektedir. Bu gelişmeden sonra aynı memristör modellerinde olduğu gibi taklitçi devreler üzerine olan çalışmalarda da bir hayli artış gözlenmiştir. Farklı elemanlarla elde edilen farklı memristör taklitçi devreleri literatürdeki yerlerini aldılar.

Bir memristör taklitçisi aynı zamanda bir memristif sistemdir ve memristör benzeri özellikler taşır. Chua’nın verdiği memristif sistem tanımlarına uyar. Chua’nın memristör taklitçisi Şekil 3.12’de görülebilir.



Şekil 3.12. Chua Memristör taklitçi devresi [1]

Chua'nın taklitçi devresi pek çok elemanlardan oluşmakta ve uygulanışı zaman alıcı gözükmemektedir. Taklitçi devre daha basit elemanlarla gerçekleştirilebilir [39]. Şekil 3.13'de memristör taklitçisi devrenin Multisim tasarımını göstermektedir.

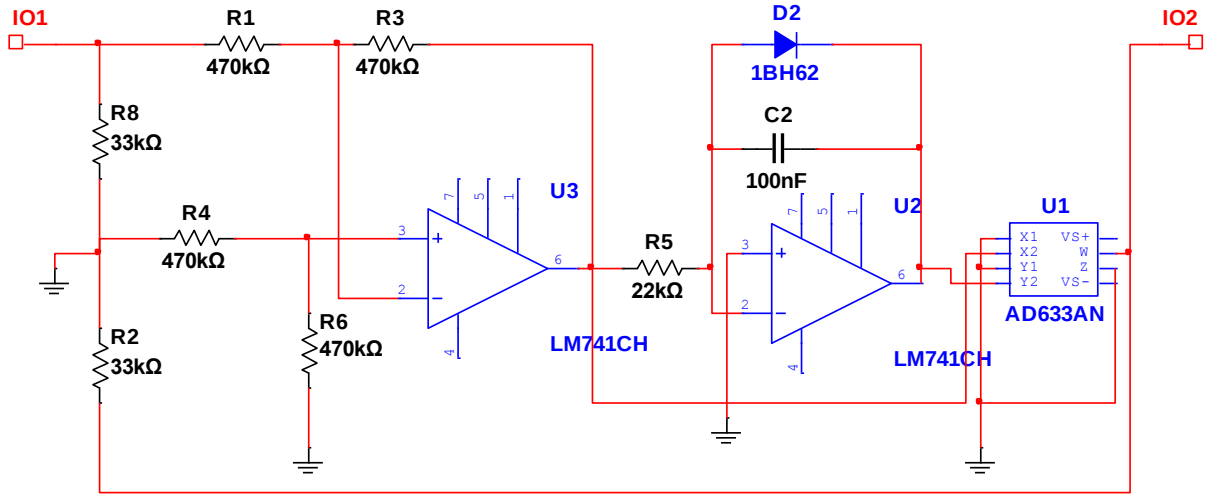


Şekil 3.13. Memristör taklitçi devresi [27]

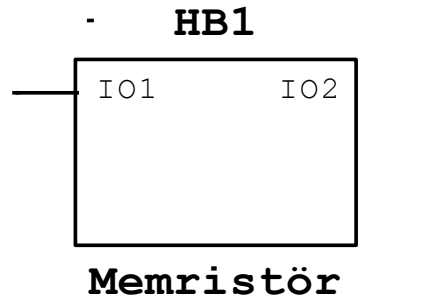
Tablo 3.1. Taklitçi devresinin eleman değerleri

Eleman Adı	Değeri	Eleman Adı	Değeri
R1	33 kΩ	R5	470 kΩ
R2	470 kΩ	R6	22 kΩ
R3	33 kΩ	R7	470 kΩ
R4	470 kΩ	C1	100 nF

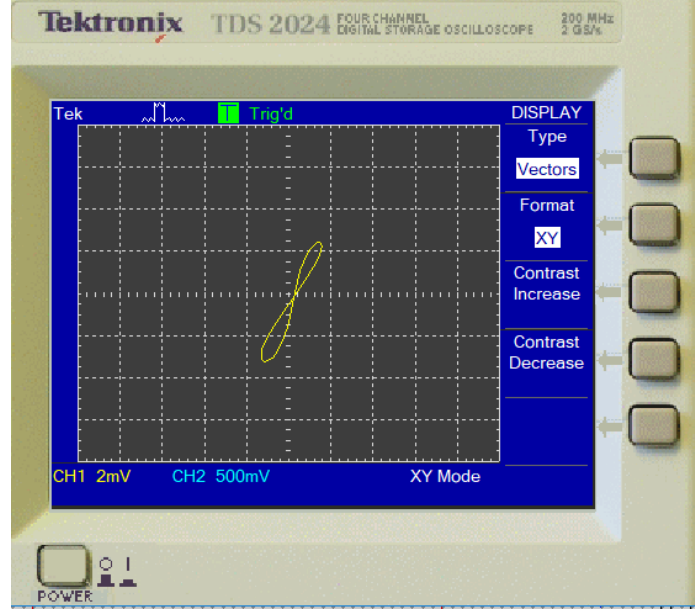
Bu taklitçi devreye yukarıda Tablo 3.1’de verilen elemanlara ait değerler devrede yerleştirilerek Şekil 3.14’deki gibi yeniden tasarlanmıştır. Ayrıca elemanların gösterimini kolaylaştırmak için Şekil 3.15’de gösterildiği gibi bir alt blok oluşturularak bundan sonraki adımlarda bu blok yapısı kullanılmıştır. Bu devreye ait akım-gerilim ilişkisi ile devrenin akım ve gerilim grafiği Şekil 3.16 ve 3.17’de gösterilmiştir.



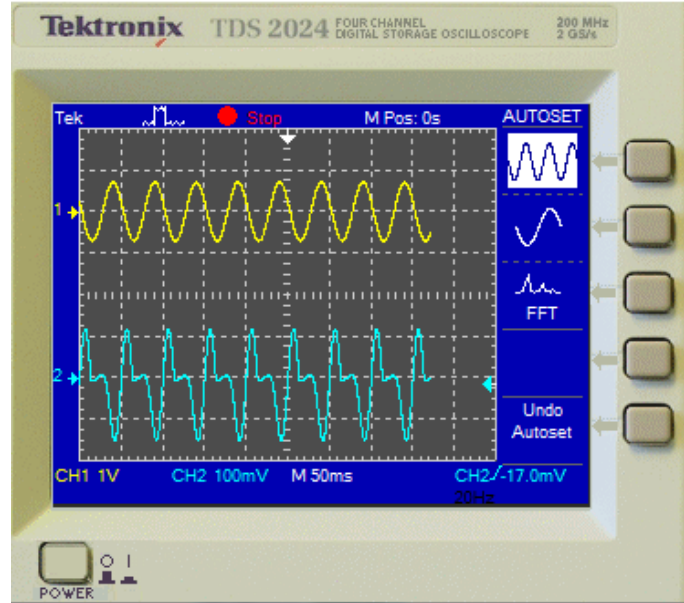
Şekil 3.14. Memristör taklitçi devresinin Multisim tasarımı [27]



Şekil 3.15. Multisim platformunda memristör devre modeli



Şekil 3.16. Taklitçi devre akım-gerilim ilişkisi [27]



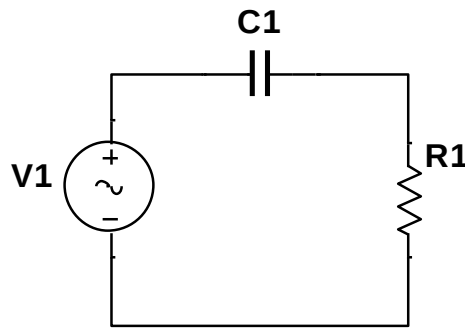
Şekil 3.17. Taklitçi devrenin akım ve gerilim grafiği [27]

4. PASİF FİLTRELER

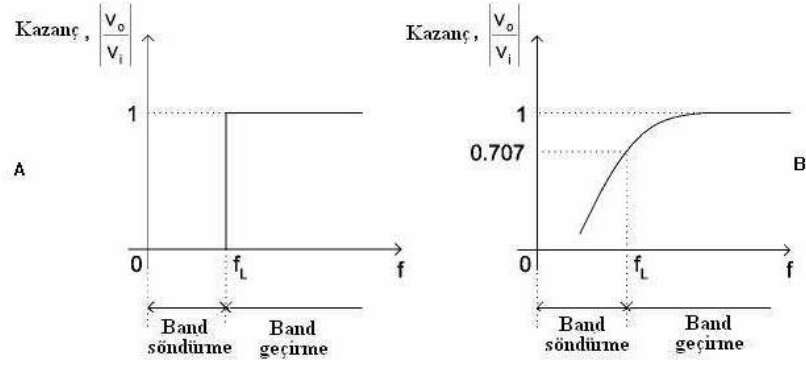
Pasif filtreler, endüktans, kapasite ve omik direnç gibi pasif elemanlar yardımıyla ortaya çıkmaktadır. Kaynak ile yük arasına yerleştirilerek temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri elimine eder. Bu filtreleri kullanmamızdaki amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşene ait frekans değerinde L ve C elemanlarının rezonansa gelmesini sağlamaktır. Pasif filtreler devreye seri ve paralel olarak bağlanabilir. Pasif filtreler literatürde yaygın olarak kullanılmakta ve opamp elemanının ilave edilmesiyle aktif filtre kapsamına geçmektedir. Burada filtre üzerinde ayrıca belirli oranlarda yükseltme yapmak da mümkündür.

4.1. Yüksek Geçiren Filtre

Yüksek geçiren filtre, düşük frekanslardaki (durdurma bandı) sinyalleri bloke etme özelliğine sahiptir. Yüksek frekanslardan (geçiş bandı) yüksek frekansdaki sinyalleri iletir. Alçak geçiren filtrelerde olduğu gibi durdurma bandı ve geçiş bandı arasındaki geçiş bölgesi mümkündür. İdeal olarak geçiş genişliği sıfır kabul edilir ve aniden artarak kesme frekansına kadar (pasif filtreler için) yükselir. Yüksek geçiren filtreler iletişim ve kontrol alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de pasif yüksek geçiren filtre yapısı gösterilmiştir. Yüksek geçiren filtre karakteristiğinin ideal ve pratik devre kazanç-frekans eğrisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Eşitlik 4.4, 4.5 ve 4.6’da yüksek geçiren filtreye ait transfer fonksiyonu ve kesim frekansının denklemleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Yüksek Geçiren Filtre



Şekil 4.2. Yüksek geçiren filtre karakteristikleri **a)** ideal filtre **b)** pratik filtre yüksek geçiren filtre [40]

$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R+1/jwC} \quad (4.1)$$

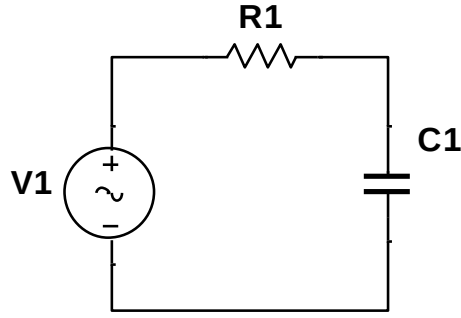
$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{jwRC}{1+jwRC} \quad (4.2)$$

$$w_c = \frac{1}{RC} \quad (4.3)$$

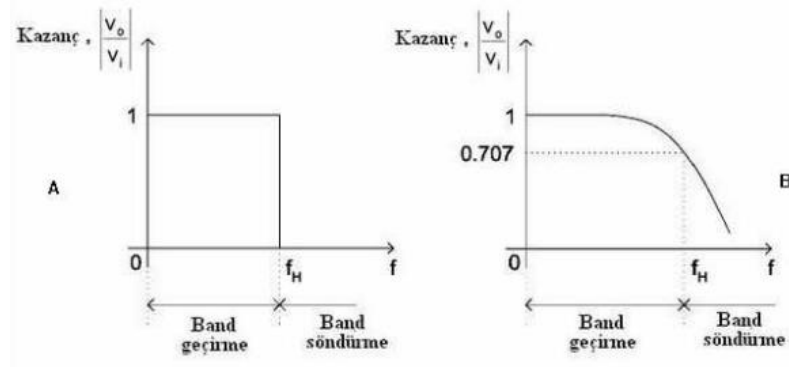
4.2. Alçak Geçiren Filtre

Bir elektronik filtrede temel görev elektrik sinyalindeki istenmeyen frekansları bastırmak ve istenen frekanslardaki sinyalleri geçirmek için sinyali yeniden şekillendirmektir.

Düşük frekanslı devrelerde (<100 kHz) pasif filtreler genellikle basit bir RC (Direnç-Kondansatör) devresinden oluşmaktadır. Bunun yanında yüksek frekanslı devrelerde ise (>100 kHz) genellikle filtreler direnç, kondansatör ve bobin içeren devrelerdir (RLC devresi). Basit bir pasif alçak geçiren devre aşağıda görüldüğü gibi bir kondansatör ve direncin bağlanmasıyla kolayca elde edilebilir. Şekil 4.3’de pasif alçak geçiren filtre yapısı gösterilmiştir ve alçak geçiren filtre karakteristiğinin ideal ve pratik devre kazanç-frekans eğrisi Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Eşitlik 4.1, 4.2 ve 4.3’de alçak geçiren filtreye ait transfer fonksiyonu ve kesim frekansının denklemleri verilmiştir.



Şekil 4.3. Alçak Geçiren Filtre



Şekil 4.4. Alçak geçiren filtre Karakteristikleri *a)* ideal filtre *b)* pratik filtre [40]

$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1/jwC}{R+1/jwC} \quad (4.4)$$

$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1+jwRC} \quad (4.5)$$

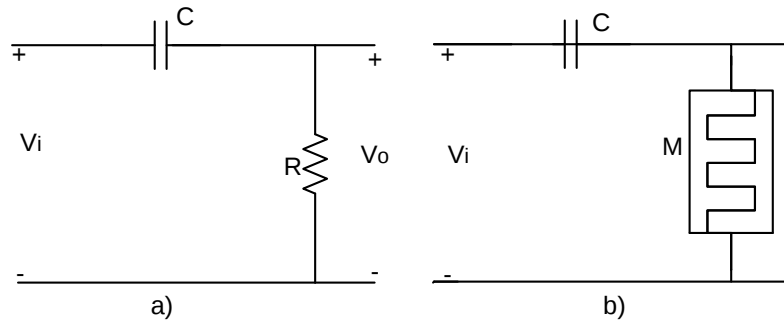
$$w_c = \frac{1}{RC} \quad (4.6)$$

4.3. Memristör Tabanlı Alçak ve Yüksek Geçiren Filtre

Memristansın sabit bir değere sahip olmaması ve uygulanan enerjiye göre değişimi, kesim frekansının ayarlanabilmesi sayesinde memristörün filtre uygulamalarında kullanımı dirence göre belirli bir avantaj sağlamaktadır. Filtrelerde memristör kullanımı ilk defa Driscoll ve arkadaşları tarafından Vanadyum dioksit (VO_2) memristörün özellikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir [41-42]. Bu çalışmada, basit bir RMLC bant geçiren filtre devresi kullanılmıştır. Bu devrede, direnç yerine VO_2 memristör, kondansatör ve bobine seri olarak bağlanmıştır. Böylece ayarlanabilir filtre deneysel olarak gösterilmiştir.

4.3.1. Memristör Tabanlı Yüksek Geçiren Filtre

Pasif filtrelerdeki direnç elemanı memristör ile değiştirilerek memristör tabanlı alçak ve yüksek geçiren filtreler elde edilmektedir. 4. bölümdeki pasif filtre denklemleri memristör için yeniden düzenlenirse aşağıda verilen denklemler elde edilir. Burada direnç yerine memristör konularak oluşturulan memristör tabanlı yüksek geçiren filtre devresi Şekil 4.5’ de gösterilmiştir. Bu devreye ait transfer fonksiyonu ve kesim frekansı Eşitlik 4.7 ve 4.8’de sırasıyla verilmiştir.



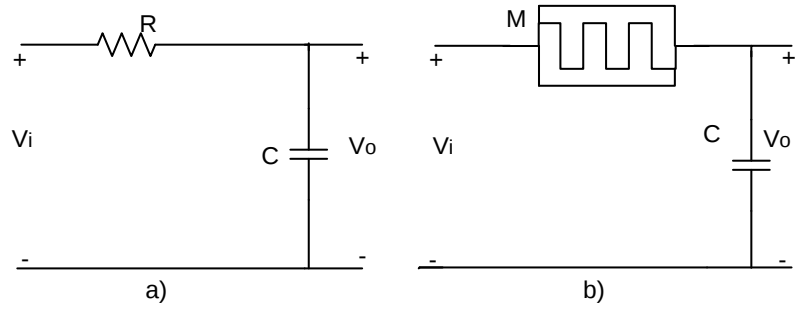
Şekil 4.5. Memristör Tabanlı Yüksek Geçiren Filtre

$$H_{MC}(s) = \frac{MCs}{MCs+1} \quad (4.7)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.8)$$

4.3.2. Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre

Pasif filtrelerdeki direnç elemanı memristör ile değiştirilerek memristör tabanlı alçak ve yüksek geçiren filtreler elde edilmektedir. 4. bölümdeki pasif filtre denklemleri memristör için yeniden düzenlenirse aşağıda verilen denklemler elde edilir. Burada direnç yerine memristör konularak memristör tabanlı oluşturulan alçak geçiren filtre devresi Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Bu devreye ait transfer fonksiyonu ve kesim frekansı Eşitlik 4.9 ve 4.10’da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.6. Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre

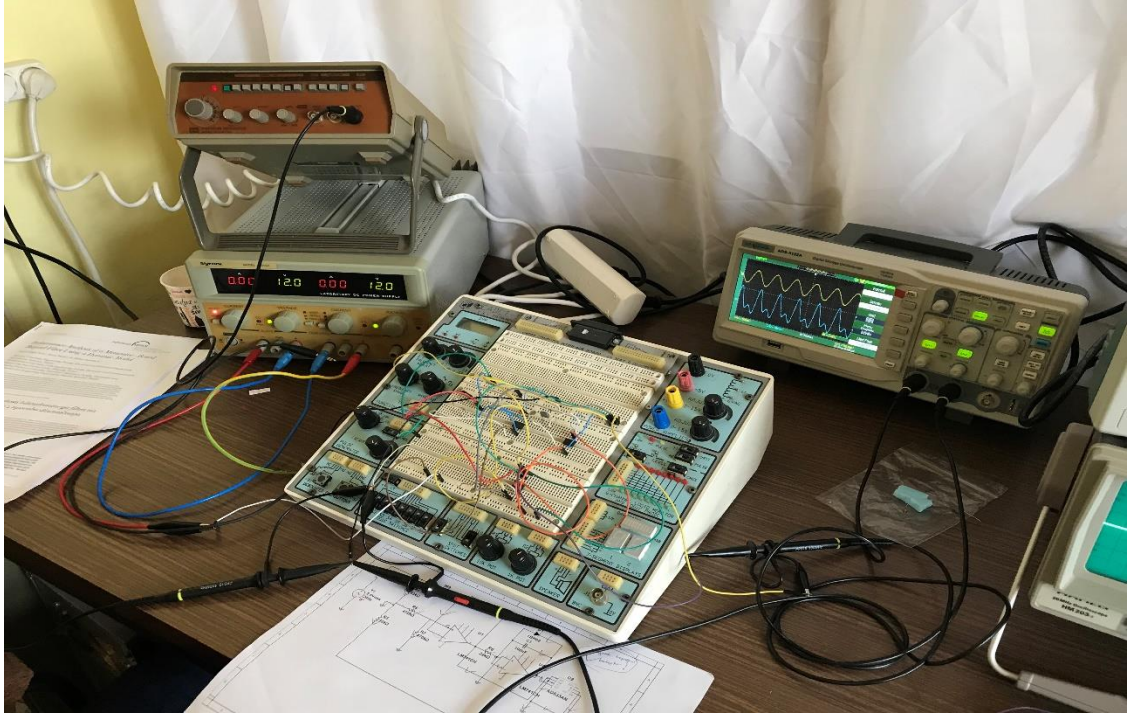
$$H_{MC}(s) = \frac{MCs}{MCs+1} \quad (4.9)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.10)$$

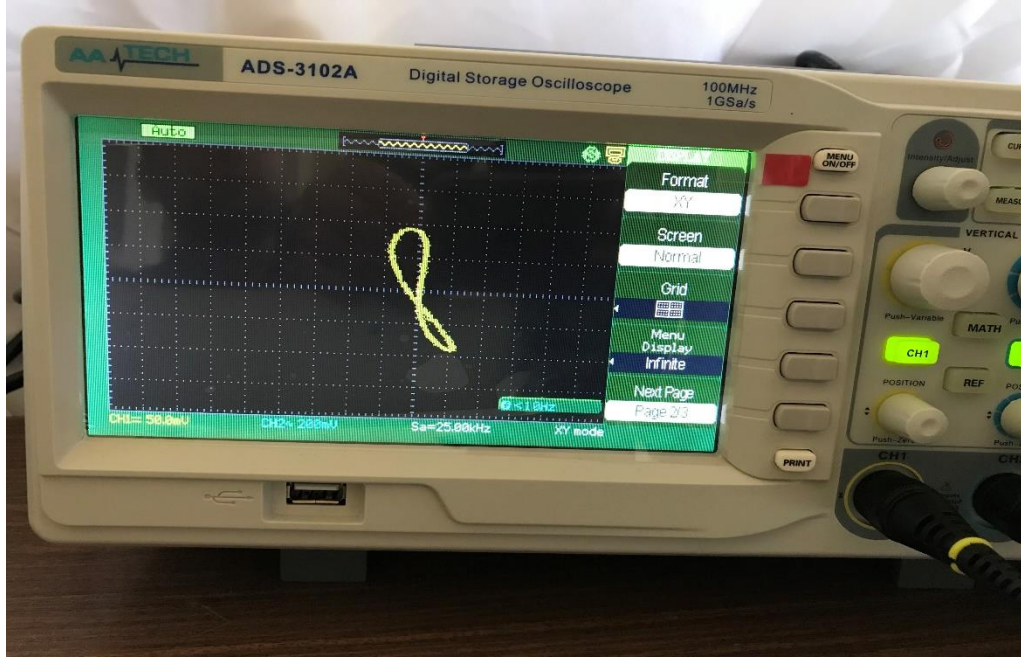
5. TAKLİTÇİ DEVRE SONUÇLARI

5.1. Memristör Taklitçi Devresi

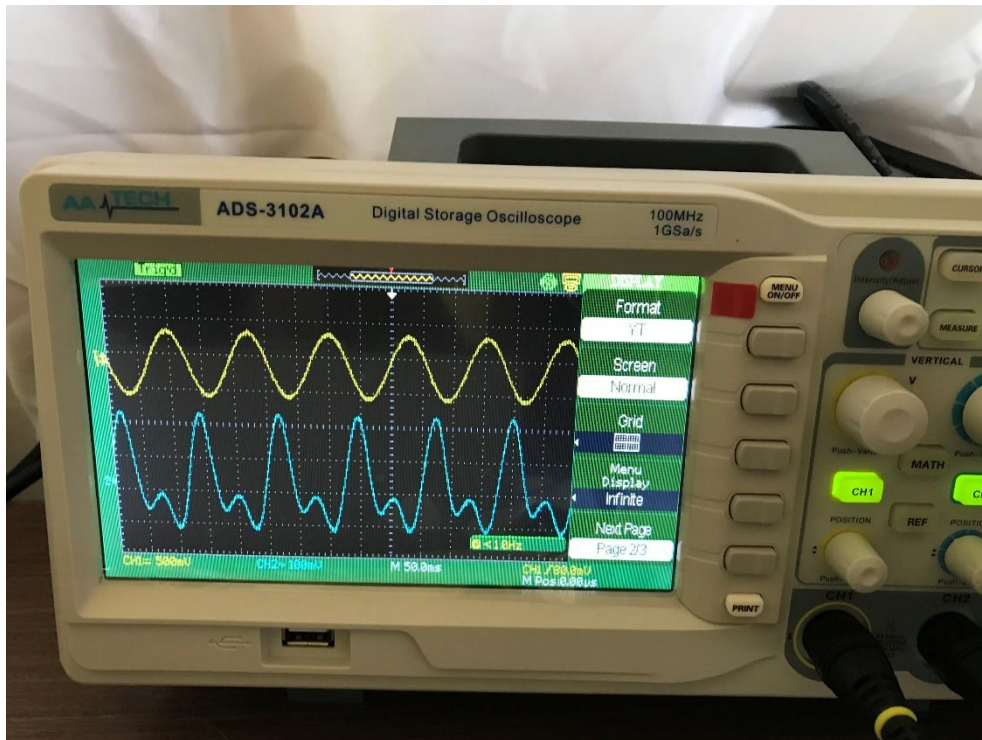
Memristör taklitçi devreleri, temel olarak mevcut devre elemanlarıyla memristörün akım-gerilim karakteristiğini gösteren, memristif davranışlar sergileyen bir devre tasarımıdır. Burada taklitçi memristör devresi olarak Chua devresinin daha basitleştirilerek literatüre sunulan bir örneği kullanılmıştır. Bu devre hem Multisim platformunda hem de laboratuvar ortamında gerçek zamanlı olarak tasarlanarak analiz edildi. Şekil 5.1’de memristör taklitçi devresinin board üzerine kurulmuş şekli gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Memristör taklitçi devresi board üzerine kurulumu



Şekil 5.2. Taklitçi devre akım-gerilim ilişkisi



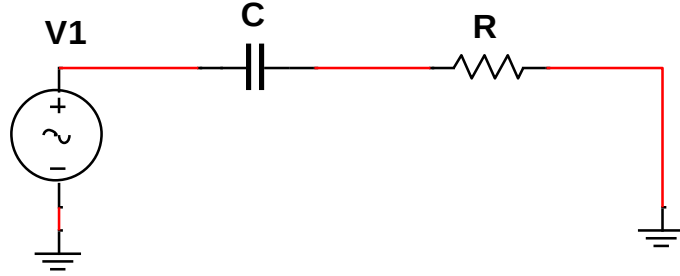
Şekil 5.3. Taklitçi devrenin akım ve gerilim grafiği

Laboratuvar ortamında oluşturulan taklitçi devreye ait devre akım-gerilim ilişkisi ile devrenin akım ve gerilim grafiği Şekil 5.2 ve 5.3' de gösterilmiştir.

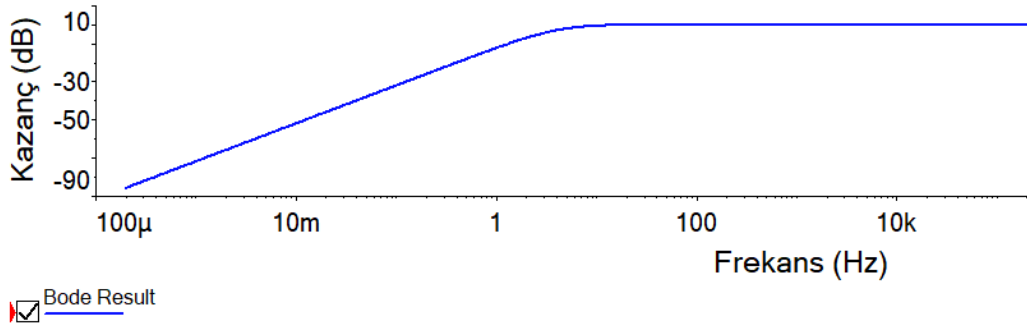
5.2. Memristör Tabanlı Yüksek Geçiren Filtre

Yüksek geçiren devre Multisim ortamında modellenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devre Şekil 5.4’de gösterilmiştir ve bu devreye ait bode eğrisi yani kazanç (gain) grafiği ve faz eğrisi (phase) sırasıyla Şekil 5.5 ve 5.6’da gösterilmiştir.

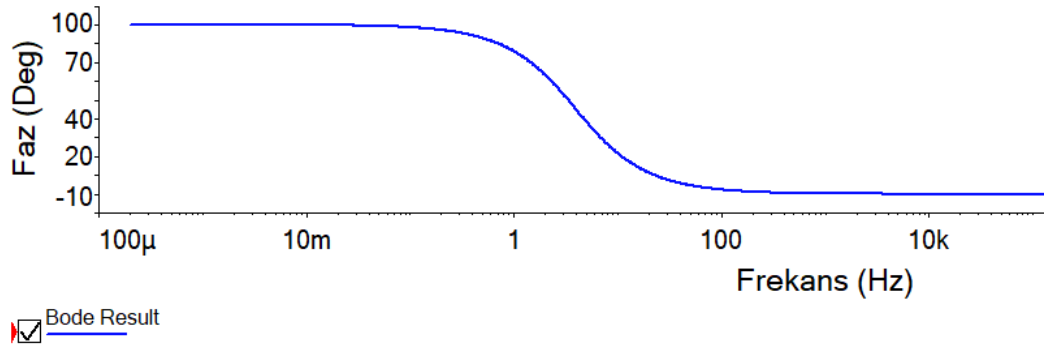
Memristör tabanlı yüksek geçiren devre Multisim ortamında modellenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Burada memristör elemanı için daha önceden anlatılan taklitçi devresi konularak kendisine seri bağlanan bir kondansatör ile filtre devresi tamamlanmıştır. Bu devre Şekil 5.7’de gösterilmiştir ve bu devreye ait bode eğrisi yani kazanç (gain) grafiği ve faz eğrisi (phase) sırasıyla Şekil 5.8 ve 5.9’da gösterilmiştir.



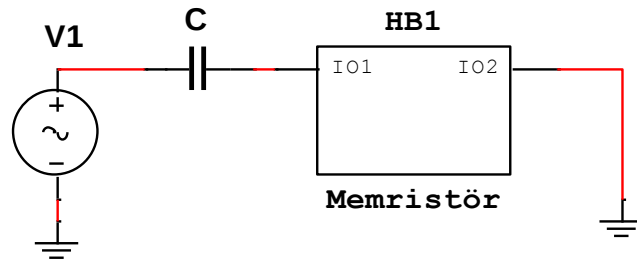
Şekil 5.4. Yüksek geçiren filtre



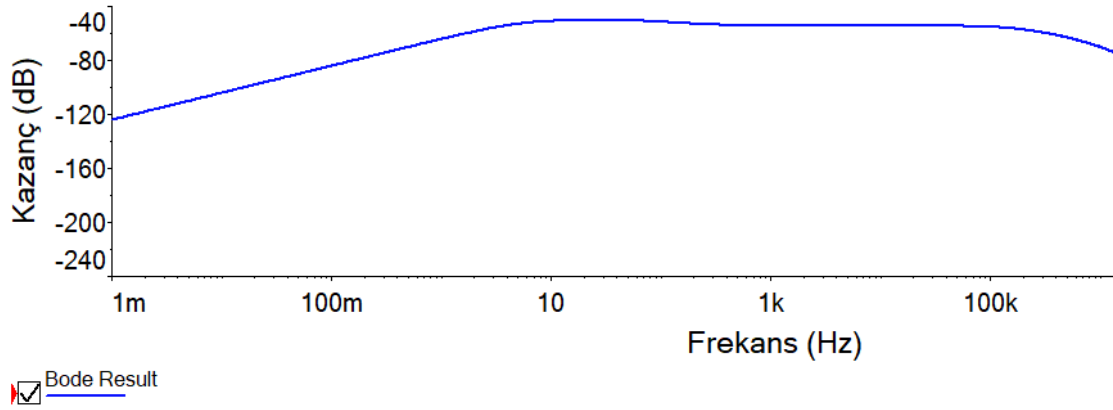
Şekil 5.5. Yüksek geçiren filtre kazanç grafiği



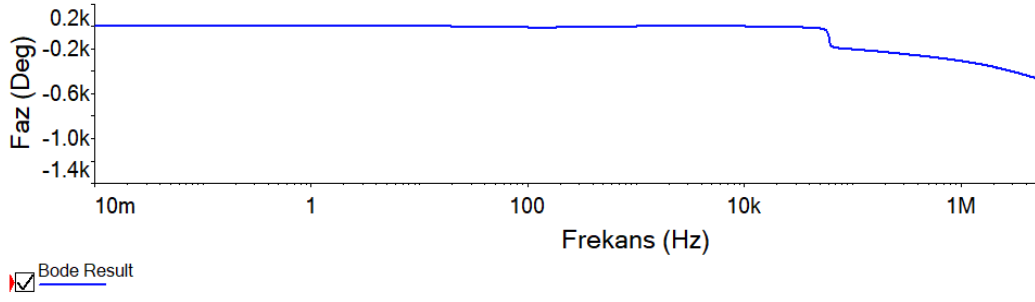
Şekil 5.6. Yüksek geçiren filtre faz eğrisi



Şekil 5.7. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre

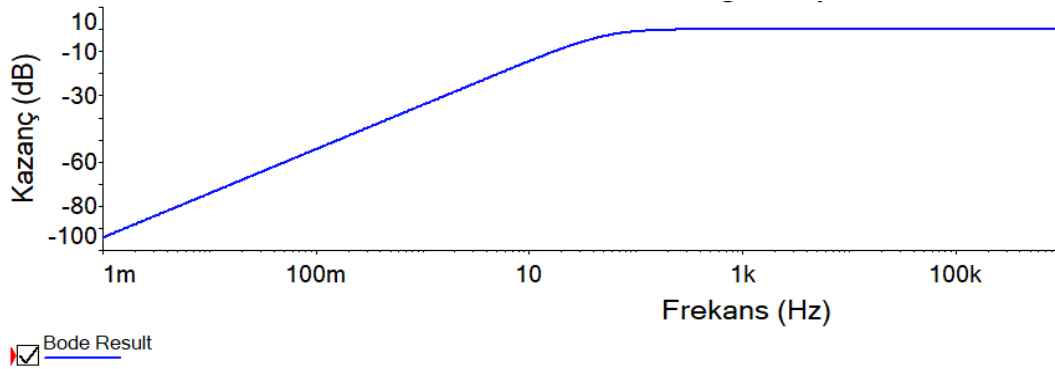


Şekil 5.8. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre kazanç grafiği (20Hz)

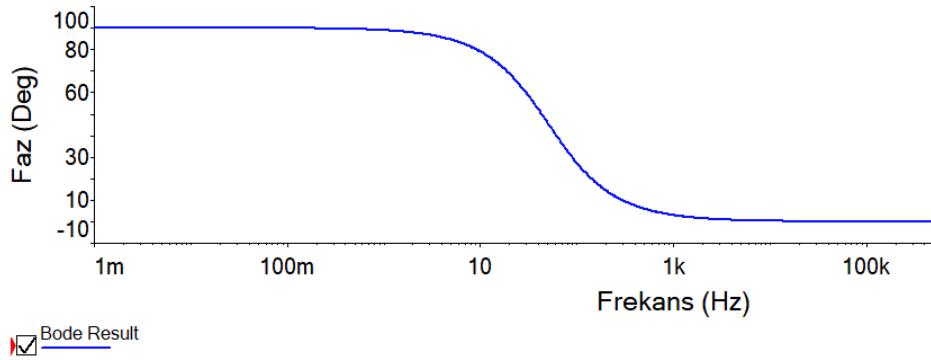


Şekil 5.9. Memristör tabanlı yüksek geçiren faz eğrisi

Memristör taklitçi devrenin girişine uygulanan sinyalin frekansı arttırıldığında memristör elemanı artık bir direnç gibi davranmakta olup kazanç ve faz eğrisi bir önceki direnç örneği ile aynı kalmaktadır. Bu devreye ait grafikler Şekil 5.10 ve 5.11’de gösterilmiştir.

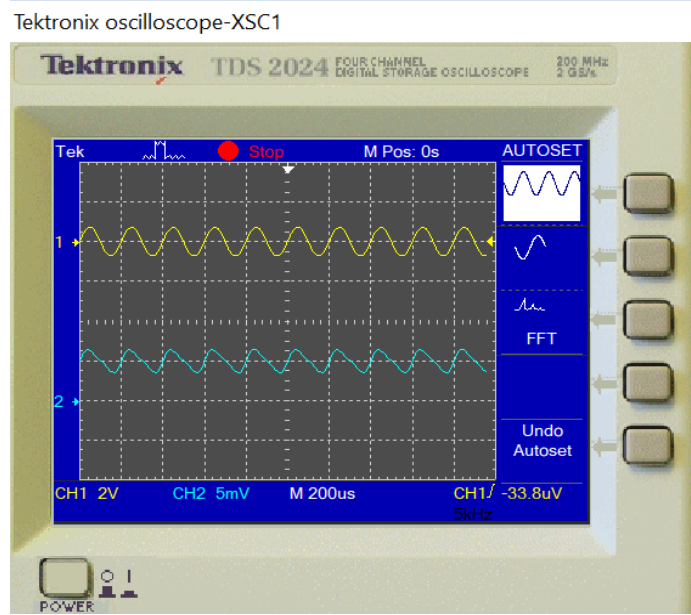


Şekil 5.10. Memristör tabanlı yüksek geçiren faz eğrisi (400 Hz)

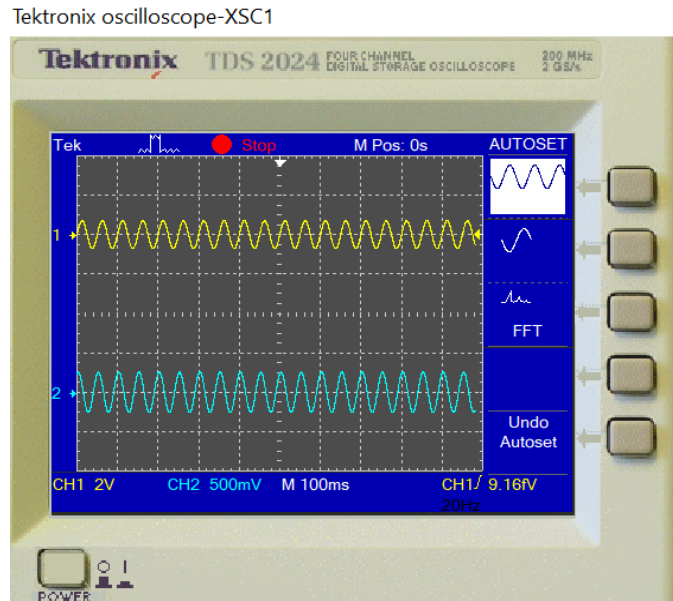


Şekil 5.11. Memristör tabanlı yüksek geçiren faz eğrisi

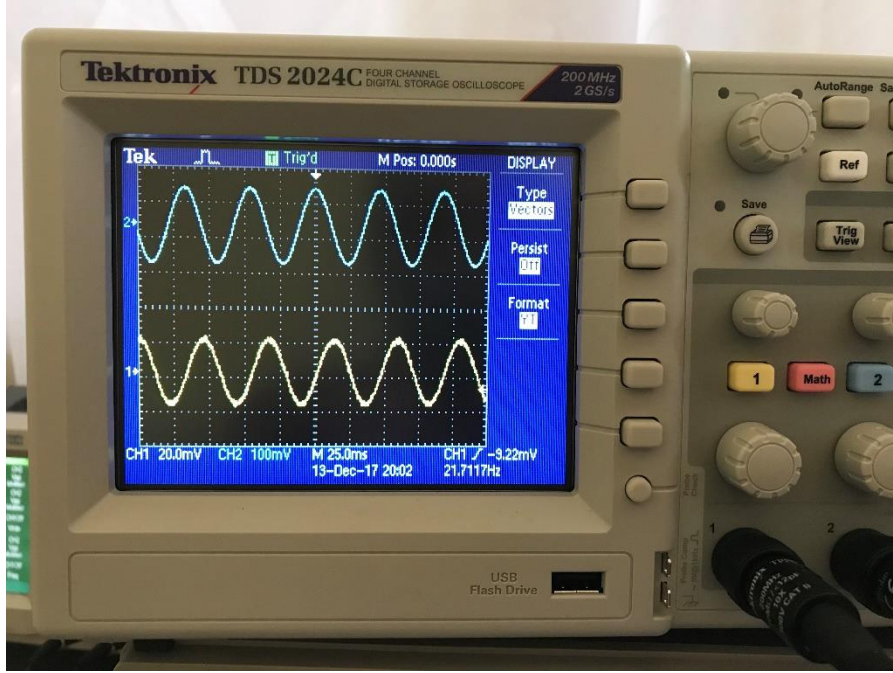
Multisim platformunda memristör tabanlı yüksek geçiren filtreye uygulanan sinyal (20 Hz) ve bu filtre devresinin çıkışında elde edilen sonuçlar Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Frekans arttırılarak memristörün belli bir değerden sonra direnç gibi davranmaya başladığı görülmekte, buna ait giriş-çıkış sinyali (400Hz) Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Şekil 5.14’de ise laboratuvar ortamında memristör taklitçisiyle oluşturulan yüksek geçiren devreye uygulanan bir sinyalin giriş ve çıkış gerilimi gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre giriş ve çıkış sinyali (20 Hz)



Şekil 5.13. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtre giriş ve çıkış sinyali (400 Hz)

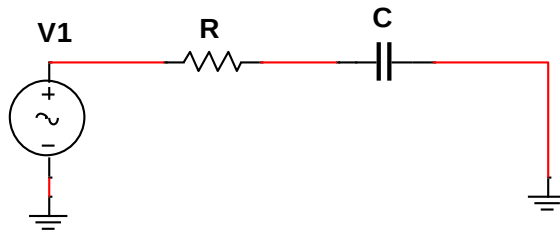


Şekil 5.14. Memristör tabanlı yüksek geçiren filtreye ait giriş ve çıkış sinyalinin gerçek zamanlı sonucu

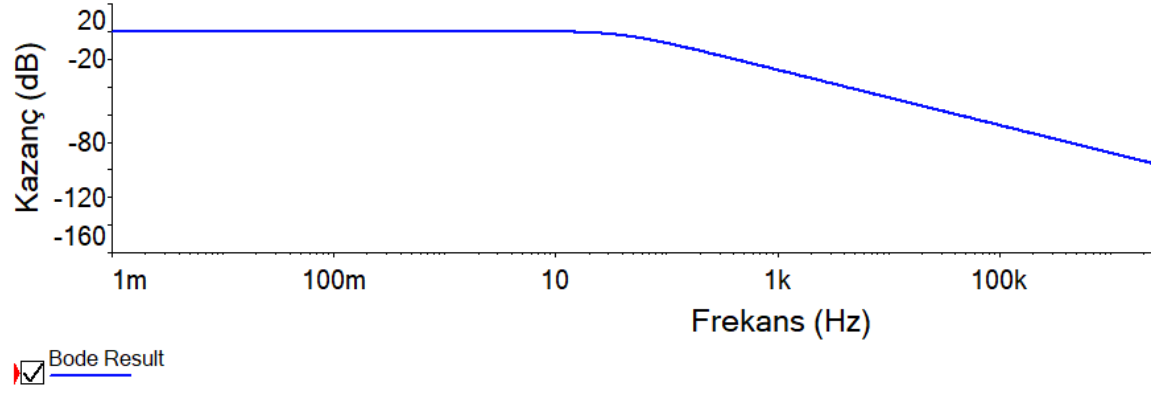
5.3. Alçak Geçiren Filtre

Alçak geçiren devre Multisim ortamında modellenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devre Şekil 5.15’de gösterilmiştir ve bu devreye ait bode eğrisi yani kazanç (gain) grafiği ve faz eğrisi (phase) sırasıyla Şekil 5.16 ve 5.17’de gösterilmiştir.

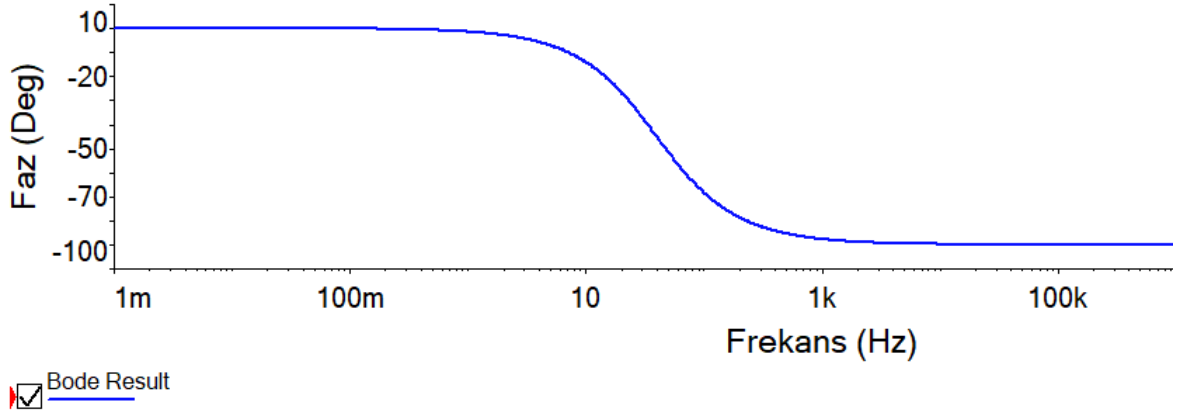
Memristör tabanlı alçak geçiren devre Multisim ortamında modellenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Burada memristör elemanı için daha önceden anlatılan taklitçi devresi konularak kendisine seri bir kondansatör bağlanmasıyla memristör tabanlı alçak geçiren filtre devresi tamamlanmıştır. Bu devre Şekil 5.18’de gösterilmiştir ve bu devreye ait bode eğrisi yani kazanç (gain) grafiği ve faz eğrisi (phase) sırasıyla Şekil 5.19 ve 5.20’de gösterilmiştir.



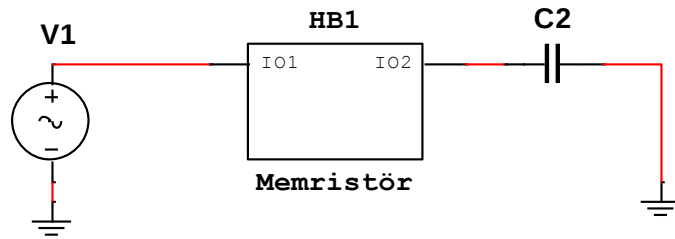
Şekil 5.15. Alçak geçiren filtre



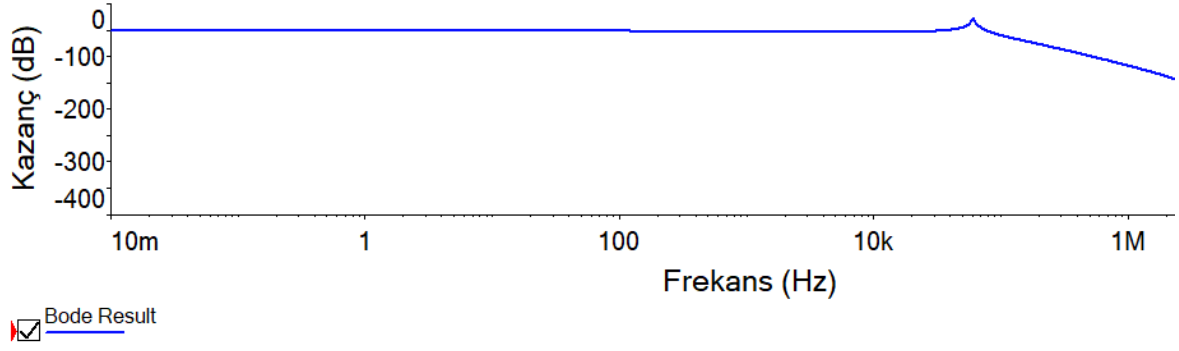
Şekil 5.16. Alçak geçiren filtre kazanç grafiği



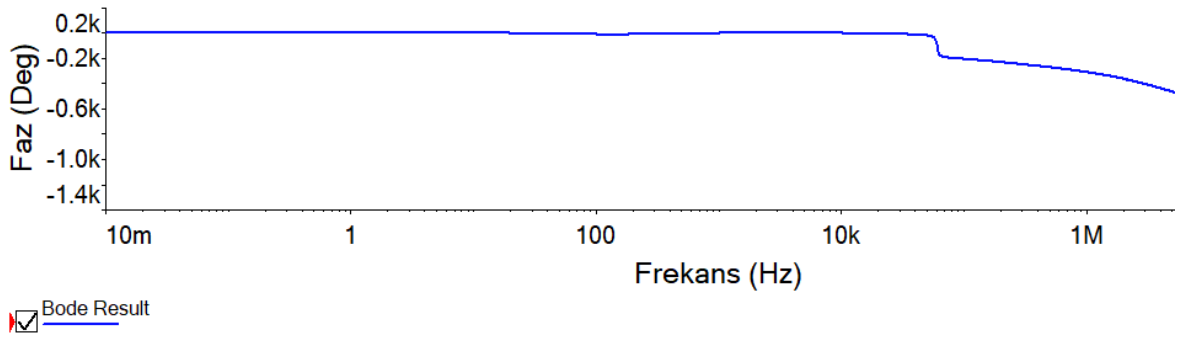
Şekil 5.17. Alçak geçiren filtre faz eğrisi



Şekil 5.18. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre

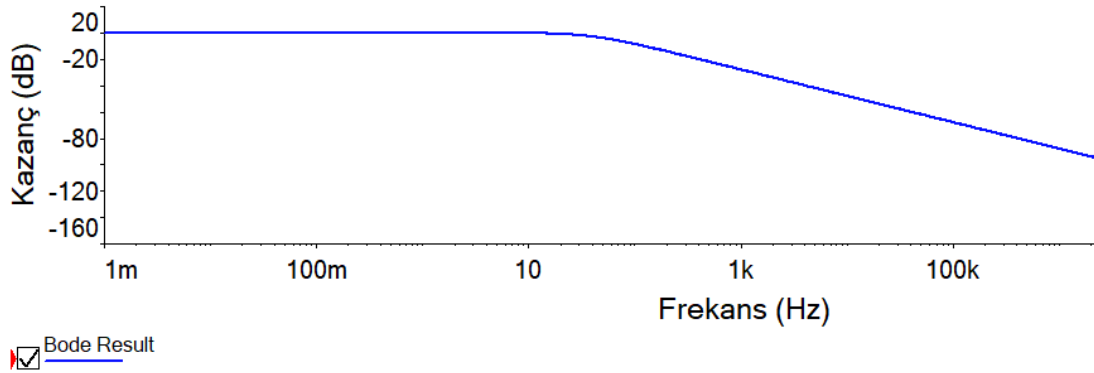


Şekil 5.19. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre kazanç grafiği (20 Hz)

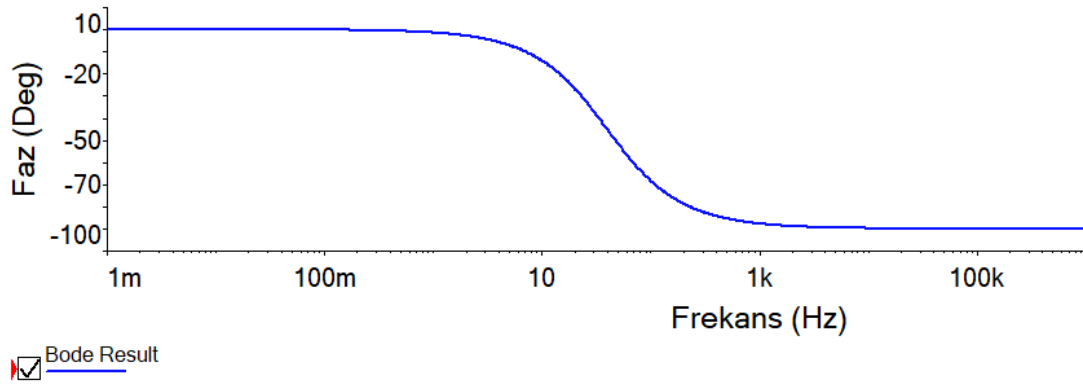


Şekil 5.20. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre faz eğrisi

Memristör taklitçi devrenin girişine uygulanan sinyalin frekansı arttırıldığında memristör elemanı artık bir direnç gibi davranmakta olup kazanç ve faz eğrisi bir önceki direnç örneği ile aynı kalmaktadır. Bu devreye ait grafikler Şekil 5.21 ve 5.22’de gösterilmiştir.

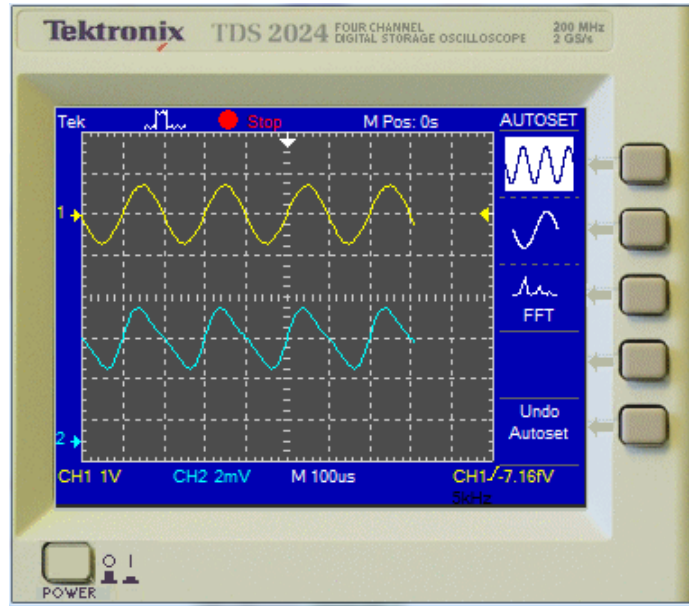


Şekil 5.21. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre kazanç grafiği (400 Hz)

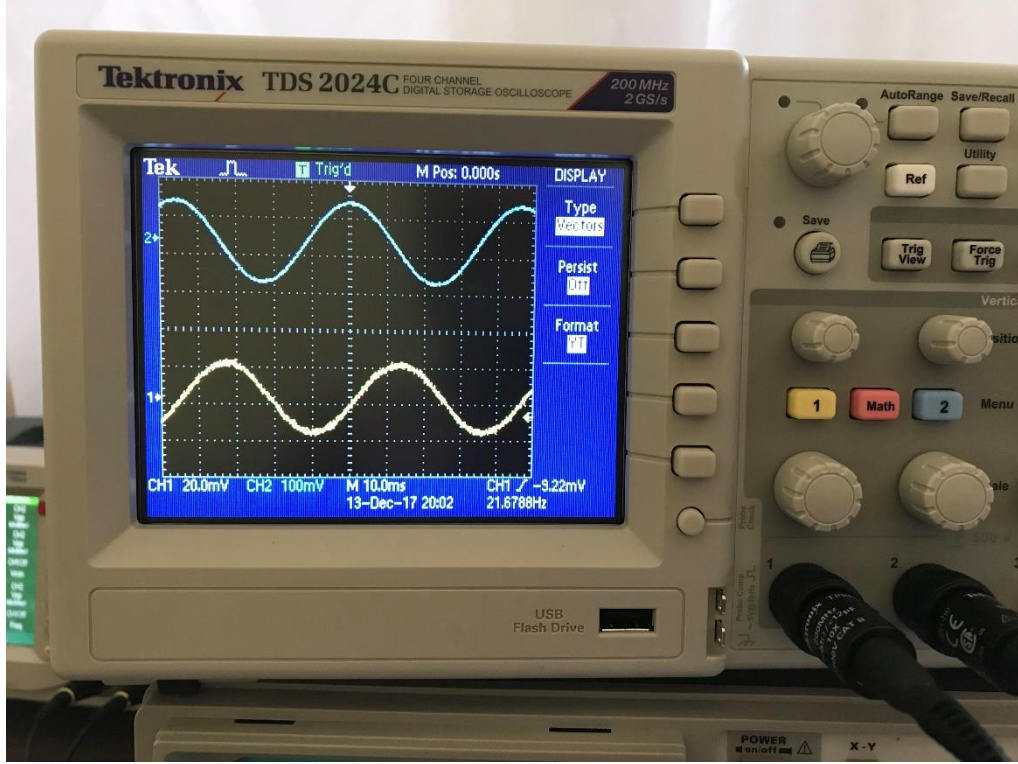


Şekil 5.22. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre faz eğrisi

Multisim platformunda memristör tabanlı alçak geçiren filtreye uygulanan sinyal (20 Hz) ve bu filtre devresinin çıkışında elde edilen sonuçlar Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Şekil 5.24’de ise laboratuvar ortamında memristör taklitçisiyle oluşturulan alçak geçiren devreye uygulanan bir sinyalin giriş ve çıkış gerilimi gösterilmektedir.



Şekil 5.23. Memristör tabanlı alçak geçiren filtre giriş ve çıkış sinyali (20 Hz)



Şekil 5.24. Memristör tabanlı alçak geçiren filtreye ait giriş ve çıkış sinyalinin gerçek zamanlı sonucu

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Memristör, 2008 yılında HP laboratuvarlarında fiziksel olarak keşfedilmesiyle bilim dünyasında merak uyandırmaya başlayan bir eleman haline gelmiştir. Bu keşifle beraber memristör üzerine yapılan çalışmalar artmaya başlamıştır. Ancak, memristörün henüz yeni bir eleman olmasından dolayı bir standardının olmaması, bilim insanlarını bu elemanın modellenmesine sevk etmiştir. Bu nedenle yapılan çalışmalar genellikle memristörün modellenmesi ve bu modellerin mevcut durumda direnç kullanılan devrelerde direncin yerine kullanılması yönünde olmuştur. Böylece memristörün dirence alternatif bir eleman olduğu ve dirence oranla daha iyi sonuçlar elde edildiği kanıtlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca memristörün hafızalı bir eleman olmasından dolayı daha önce teorik olarak ortaya konulmuş ancak mevcut elemanların yetersizliği nedeniyle oluşturulması mümkün olmayan devreler de memristörle beraber gündeme gelmeye başlamıştır.

Memristörün frekansı değiştiğinde Akım-Gerilim (I-V) karakteristiğinde değişimler meydana gelmektedir. Memristör devre elemanının özelliklerinden dolayı frekans arttırıldıkça histerezis eğrisi daralır ve sonunda doğrusal bir hal alır önermesi doğrulanmıştır. Yani frekansı arttırdıkça I-V karakteristiğinin histerezis eğrisi gittikçe daralmış ve sonunda belirli bir frekans değerine ulaştığında doğru bir hal almıştır.

Bu modellerin doğruluğunu kanıtlamak için modeller filtre devrelerine uygulanmıştır. Bu uygulamaların gerçekleştirilmesi için, Alçak Geçiren Filtre (AGF) ve Yüksek Geçiren Filtre (YGF) devreleri kullanılmıştır. Her bir model için ayrı ayrı devre benzetimi yapılmış ve uygulandıkları filtre devrelerinin sonuçları memristör tabanlı filtre uygulamaları bölümünde paylaşılmıştır. Bu modeller, direnç kullanılan filtre devreleriyle karşılaştırılmış ve modellerin doğruluğu gösterilmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında diğer modellerden farklı olarak frekansa bağımlı modelin filtre devrelerinde kullanılması, filtre devrelerinin frekansa bağlı olarak çalışmasından dolayı daha uygun sonuçlar vermiştir.

6.2. Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen modeller incelenmiş ve LabVIEW-Multisim ortamında gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamında bu modeller gerçek zamanlı olarak analiz edilmiştir. Memristör taklitçi devresinin yerine kullanılacak fiziksel bir memristör elemanı sayesinde filtre devlerinin genel özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olabilecektir. Pasif filterelerden sonra yapılacak memristör tabanlı aktif filtreler istenilmeyen sinyallerin yok edilmesinde büyük rol oynayacaktır. Son olarak elde edilen modellerin farklı devre uygulamalarında kullanılmasıyla farklı çalışma alanlarında memristör tabanlı filtre devrelerinin kullanılması giderek artabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Chua, L., 1971. Memristor-The Missing Circuit Element. IEEE Transactions On Circuit Theory, 18(5):507-519.
- [2] Chua, L. O., Kang, S. M., 1976. Memristive Devices And Systems. Proceedings Of The IEEE, 64(2):209-223.
- [3] Strukov, Dmitri B., Et Al. "The Missing Memristor Found." Nature 453.7191 (2008): 80-83.
- [4] Thakoor, S., Moopenn, A., Daud, T., Thakoor, A. P., 1990. Solid State Thin Film Memistor For Electronic Neural Networks. Journal Of Applied Physics, 67(6):3132-3135.
- [5] Buot, F. A., Rajagopal, A. K., 1994. Binary Information Storage At Zero Bias In Quantum-Well Diodes. Journal Of Applied Physics, 76(9):5552-5560.
- [6] Beck, A., Bednorz, J. G., Gerber, C., Rossel, C., Widmer, D., 2000. Reproducible Switching Effect In Thin Oxide Films For Memory Applications. Journal Of Applied Physics, 77(1):139-141.
- [7] Liu, S. Q., Wu, N. J., Ignatiev, A., 2001. A New Concept For Non-Volatile Memory: The Electric-Pulse Induced Resistive Change Effect In Colossal Magnetoresistive Thin Films, Pp. 18-24. Non-Volatile Memory Technology Symposium, November, 2001.
- [8] Snider, G. S., 2007. Hewlett-Packard Development Company, L.P., Assignee, Architecture And Methods For Computing With Reconfigurable Resistor Crossbars. US Patent 7 203 789, April 10, 2007.
- [9] Itoh, M., Chua, L. O., 2008. Memristor Oscillators. International Journal Of Bifurcation And Chaos, 18(11):3183-3206.
- [10] Muthuswamy, B., Kokate, P. P., 2009. Memristor Based Chaotic Circuits. IETE Technical Review, 26(6):415-426.
- [11] Bao, B. C., Liu, Z., Xu, J. P., 2010. Transient Chaos in Smooth Memristor Oscillator. Chinese Physics B, 19(3):030510.
- [12] Mahvash, M. ve Parker, A. C., 2010, A memristor SPICE model for designing memristor circuits, Circuits and Systems (MWSCAS), 2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on, 989-992.

- [13] Buscarino, A., Fortuna, L., Frasca, M., Gambuzza, L. V., Sciuto, G., 2012. Memristive Chaotic Circuits Based On Cellular Nonlinear Networks. *International Journal Bifurcations And Chaos*, 22(3):1250070.
- [14] Shadaram, A., Mirzakuchaki, S. ve Zakerian, F., 2011, A Non-Linear, Ionic Drift, Spice Compatible Model for Memristors, *Proc. Int. Conf. Circuits, Syst. Simulation*, 242-246.
- [15] Qi, A., Wang, G., 2011. Chaotic Oscillator Based On Memristor And Its Circuit Implementation, Pp. 328-331. *IWCFTA, 2011 Fourth International Workshop On Chaos-Fractals Theories And Applications*, October 19-22, Hangzhou.
- [16] Kvatinsky, S., Friedman, E. G., Kolodny, A. ve Weiser, U. C., 2013, TEAM: threshold adaptive memristor model, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60 (1), 211-221.
- [17] Song, D., Ren, X., Lv, M., Li, M., Zhou, H. ve Zu, Y., 2013, The Realization and Working Conditions of Memristor Based on Multisim, *Journal of Computer and Communications*, 1 (06), 5.
- [18] Koksall, Muhammet, And Serdar E. Hamamci. "Analysis Of Four Element Chua Circuit Containing New Passive Component Memristor." *3rd Conference On Nonlinear Science And Complexity*, Ankara, Turkey. 2010.
- [19] Driscoll, T., Et Al. "Chaotic Memristor." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 102.4 (2011): 885-889.
- [20] Iu, Herbert Ho-Ching, et al. "Controlling chaos in a memristor based circuit using a twin-T notch filter." *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 58.6 (2011): 1337-1344.
- [21] Ascoli, A., Tetzlaff, R., Corinto, F., Mirchev, M. ve Gilli, M., 2013, Memristor-based filtering applications, *Test Workshop (LATW), 2013 14th Latin American*, 1-6.
- [22] Yener, Şuayb Çağrı, Reşat Mutlu, And Hakan Kuntman. A New Memristor-Based High-Pass Filter/Amplifier: Its Analytical And Dynamical Models. *Radioelektronika (Radioelektronika)*, 2014 24th International Conference. IEEE, 2014.
- [23] Yener, Şuayb, Reşat Mutlu, And H. Hakan Kuntman. "Analysis Of Filter Characteristics Based On PWL Memristor." *IU-Journal Of Electrical & Electronics Engineering* 14.1 (2014): 1709-1719.

- [24] Sozen, Hasan, and Ugur Cam. "On the realization of memristor based RC high pass filter." *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2013 8th International Conference on. IEEE, 2013.
- [25] Sahin, ME, Guler, H., Kaya T., LabVIEW Model Of Memristor With Nonlinear Dopant Drift *European Journal of Technic* 6 (2), 124-130,2016
- [26] Sahin, ME, Guler, H, TiO₂ Memristor Modelling with LabVIEW, Firat University *Turkish Journal of Science & Technology*, 12 (2), 79-83, 2017
- [27] Sahin, ME, Guler, H, The Design of Memristor Based High Pass Filter Circuit, The 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 2017, 494-497
- [28] Arık, S., 2015, Memristör Tabanlı Nonlineer Sistem Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri
- [29] Adam, G. C., Hoskins, B. D., Prezioso, M., Merrih-Bayat, F., Chakrabarti, B. ve Strukov, D. B., 2017, 3-D memristor crossbars for analog and neuromorphic computing applications, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64 (1), 312-318.
- [30] Keshmiri, Vahid. "A Study of the Memristor Models and Applications." (2014).
- [31] D. Strukov, R. Williams, "Exponential ionic drift: fast switching and low volatility of thin-film memristors", *Applied Physics A*, vol. 94, no. 3, pp. 515--519, March 2009.
- [32] 1st Symposium on Memristors and Memristive Systems, UC Berkeley, 2008. Video clips available at: <https://www.youtube.com/watch?v=QFddPzcZwbs>
- [33] Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y.S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S.F., Abbott, D., 2010. The fourth element: characteristics, modelling, and electromagnetic theory of the memristor. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 466(2120):2175-2202.
- [34] Prodromakis, T., Peh, B. P., Papavassiliou, C., Toumazou, C., 2011. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58(9):3099-3105.
- [35] Biolek, Z., Biolek, D., Biolkova, V., 2009. Spice model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radioengineering*, 18(2):210-214.
- [36] Benderli, S., Wey, T. A., 2009. On SPICE macromodelling of TiO₂ memristors. *Electronics Letters*, 45(7):377-379.

- [37] Pickett, M. D., Strukov, D. B., Borghetti, J. L., Yang, J. J., Snider, G. S., Stewart, D. R., Williams, R. S., 2009. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices. *Journal of Applied Physics*, 106(7):074508.
- [38] Mutlu, R., Karakulak, E., 2009. Mühendislik eğitiminde kullanılabilecek bir memristör (hafızalı direnç) taklit devresi, pp. 311-314. 13. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi.
- [39] Mutlu, R., Karakulak, E., 2010. Emulator circuit of TiO₂ memristor with linear dopant drift made using analog multiplier, pp. 380-384. ELECO 2010, National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2-5 Aralık, Bursa.
- [40] Erişim zamanı 23 Kasım 2017, <http://slideplayer.biz.tr/slide/2004463/>
- [41] Pershin, Y. V. ve Di Ventra, M., 2010, Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors, *Electronics Letters*, 46 (7), 517-518.
- [42] Driscoll, T., Quinn, J., Klein, S., Kim, H.-T., Kim, B., Pershin, Y. V., Di Ventra, M. ve Basov, D., 2010, Memristive adaptive filters, *Applied Physics Letters*, 97 (9), 09350

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	Alper KARACA
Doğum Yeri	Çorlu
Doğum Tarihi	26.07.1990

LİSANS EĞİTİM BİLGİLERİ

Üniversite	Fırat Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölüm	Elektrik-Elektronik Müh.

YABANCI DİL BİLGİSİ

İngilizce	KPDS (....) ÜDS (....) TOEFL (....) EILTS (....)
KPDS	45

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurum	Arçelik A.Ş.
Görevi/Pozisyonu	Servis Yönetmeni
Tecrübe Süresi	4 yıl

KATILDIĞI

Kurslar	Psikodrama, Arçelik Akademi
Projeler	Pompa motoru test cihazı, Nps proje ekibi

İLETİŞİM

Adres	Süsrü mah. M.Cemiloğlu cad. Nehir sit. Beril apt. No:10
E-mail	alper.karaca@arcelik.com.tr

